



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**NÁVRH MODERNIZACE PŘÍSTROJE MESING PRO
KALIBRACI KONCOVÝCH MĚREK NAD 100 MM**

PROPOSAL OF MODERNIZING THE MESING INSTRUMENT TO CALIBRATE THE GAUGE
BLOCKS OVER 100 MM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Antonín Sokl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Šrámek

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Antonín Sokl**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **Ing. Jan Šrámek**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh modernizace přístroje Mesing pro kalibraci koncových měrek nad 100 mm

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kalibrace koncových měrek v rozsahu (125 – 1000) mm se provádí na pracovišti ČMI Brno již několik desetiletí. V devadesátých letech byl do provozu uveden přístroj Mesing, jenž spolehlivě slouží dodnes. V současné době je přístroj, přes opakované modernizace, již morálně i technicky zastaralý. Navíc v případě poruchy elektronické části nelze zajistit dodávky náhradních dílů. Předmětem diplomové práce je shrnutí současného stavu hw i sw daného přístroje a požadavků kladených na kalibraci koncových měrek. Dále pak návrh variant možného řešení modernizace, včetně rešerše použitelných komponent k dané modernizaci dostupných na trhu. Pro navrhování řešení je nutné stanovit nejistotu měření při kalibraci koncových měrek kvalifikovaným odhadem a simulací metodou Monte Carlo.

Cíle diplomové práce:

Analýza současného technického stavu přístroje.

Analýza požadavků na kalibraci koncových měrek dle ČSN EN ISO 3650. Rešerše možných technických řešení a výběr vhodných komponentů.

Návrh nejvhodnějšího řešení modernizace.

Kvalifikovaný odhad nejistoty měření pro navrhovaná řešení modernizace.

Simulace nejistoty měření metodou Monte Carlo pro navrhovaná řešení.

Zhotovení technické dokumentace k návrhu modernizace.

Seznam doporučené literatury:

PERNIKÁŘ, Jiří a TYKAL, Miroslav. Strojírenská metrologie II. 1. vydání. Brno: CERM, 2006. ISBN 80-214-3338-8.

ŠRÁMEK, Jan. Nejistoty měření přesných délkových měření II. Diplomová práce. Brno: VUT FSI – ÚVSSR, 2011.

KLVAŇA, Jiří. Principy a aplikace metody Monte Carlo. Praha: České vysoké učení technické, 2006. ISBN 80-01-03587-5.

ČSN EN ISO 3650. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Etalony délek – Koncové měřky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000. 24 s. Třídící znak 253308.

EA 4/02:2013. Vyjadřování nejistot měření při kalibracích (Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration (previously EAL- R2)). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 74 stran.

TNI 01 0115:2009. Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 90 stran. Třídící znak 83031.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce, která pojednává o návrhu modernizace přístroje na kalibraci dlouhých koncových měrek, je poskytnutí detailní analýzy současného technického stavu tohoto přístroje a rešerše požadavků na kalibraci koncových měrek. Úvodní část práce je věnována definování základních metrologických pojmů a termínů. Jedna ze samostatných kapitol obsahuje podrobnou charakteristiku přístroje pro kalibraci dlouhých koncových měrek Zeiss/Tesa nacházejícím se na Českém metrologickém institutu v Brně a možnosti jeho modernizace. V praktické části práce je zjišťován kvalifikovaný odhad nejistoty měření a prováděna simulace nejistoty měření za pomoci metody Monte Carlo. Závěrečná kapitola obsahuje technickou dokumentaci navrhované modernizace.

ABSTRACT

The aim of this thesis, which deals with the modernization of the Zeiss/Tesa device, which is designed to calibrate the gauge blocks, is to provide a detailed analysis of the current state of the art of this instrument and to search for gauge blocks calibration requirements. The introductory part of the thesis is devoted to the definition of basic metrological concepts and terms. One of the separate chapters contains an elaborate description of the Zeiss/Tesa device and the possibilities of its modernization. A qualified estimation of the measurement uncertainty is determined in the practical part of the thesis and a simulation of the measurement uncertainty is performed using the Monte Carlo method. The final chapter contains the technical documentation of the proposed modernization.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mesing, kalibrace koncových měrek, metoda Monte Carlo, kvalifikovaný odhad nejistoty, simulace nejistoty, metrologická návaznost měřidel.

KEYWORDS

Mesing, gauge blocks calibration, Monte Carlo method, qualified estimation of uncertainty, uncertainty simulation, metrological traceability of measuring instruments.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SOKL, Antonín. *Návrh modernizace přístroje Mesing pro kalibraci koncových měrek nad 100 mm*. Brno, 2019, 97s., Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117481>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Šrámek.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Janu Šrámkovi za odborné vedení, cenné připomínky a rady při zpracování mé diplomové práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Šrámk a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. 5. 2019

.....
Bc. Antonín Sokl

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVACE	17
3	ZÁKLADNÍ METROLOGICKÉ POJMY A DEFINICE	19
3.1	Definice metrologických termínů	20
3.2	Chyby měření	24
3.3	Vyjádření nejistoty měření	26
3.3.1	Stanovení standardní nejistoty typu A	28
3.3.2	Stanovení standardní nejistoty typu B	29
3.3.3	Kombinovaná nejistota měření	33
3.3.4	Rozšířená nejistota měření	34
3.4	Koncové měřky	35
4	METROLOGICKÁ NÁVAZNOST MĚŘIDEL	41
5	METODA MONTE CARLO	43
5.1	Princip a využití metody MONTE CARLO	43
5.2	Příklad MMC - výpočet Ludolfova čísla	45
5.3	Výpočet nejistot měření pomocí metody MONTE CARLO	47
5.4	Generování náhodných čísel	48
5.5	Používaný software pro metodu MONTE CARLO	48
6	CHARAKTERISTIKA PŘÍSTROJE ZEISS/TESA A MOŽNOSTI JEHO MODERNIZACE	51
6.1	Modernizace	53
6.2	Snímání délky	53
6.2.1	Indukčnostní snímače	53
6.2.2	Optický snímač	57
6.3	Snímání teploty	59
7	ODHAD NEJISTOTY MĚŘENÍ PRO NAVRHOVANÉ ŘEŠENÍ MODERNIZACE	63
7.1	Simulace metodou Monte Carlo	74
8	TECHNICKÁ DOKUMENTACE	81
9	ZÁVĚR	83
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	85
11	SEZNAM TABULEK, OBRÁZKŮ, ZKRATEK A SYMBOLŮ	87
11.1	Seznam tabulek	87
11.2	Seznam obrázků	87
11.3	Seznam zkratk	89
11.4	Seznam symbolů	89
12	SEZNAM PŘÍLOH	93

1 ÚVOD

Současná společnost si umí jen těžko představit život bez mechanických, elektronických či jiných technologických přístrojů. Technika nás zkrátka obklopuje, usnadňuje každodenní činnosti a někdy také umožňuje procesy, které by bez ní ani nebylo možné uskutečnit. Věřím, že v technologických oblastech je nezbytné klást důraz především na přesnost, neboť se domnívám, že bez ní nikdy nelze dosáhnout náležité kvality, s kterou je spojena i výsledná životnost a jakost výstupních součástí, přístrojů nebo například výrobků. Na základě této premisy jsem si jako téma své diplomové práce vybral modernizaci přístroje „Zeiss/Tesa“, jehož úkolem je provedení kalibrace dlouhých koncových měrek. Také u něj je preciznost stěžejní, neboť vytváří základ, podle něhož bude správnost délek dále ověřována. Přestože lze předmětné kalibrace dosáhnout i pomocí interferometru, ve své diplomové práci jsem se jím nezabýval a zaměřil jsem se pouze na přístroj, který využívá indukčnostní snímače, jelikož jeho provozní náklady jsou nesrovnatelně nižší. Pokládám za ekonomičtější pomocí inovací obnovit stávající a v praxi léty ověřenou metodu.

Pomineme-li úvodní a závěrečnou část, je práce členěna do šesti hlavních kapitol. V první z nich se věnuji vymezení základních metrologických pojmů a jejich definic. Přestože je práce zaměřena čistě technickým směrem a lze se domnívat, že nejdůležitější formulace budou odborné veřejnosti známy, jedná se dle mého názoru o stěžejní stavební kámen, který práci učiní přehlednou a napomůže k jejímu snadnějšímu porozumění. Obecně je tedy definována metrologie, kalibrace, měření a všechny jeho doplňující charakteristiky, jako jsou chyby měření, nejistoty a odchylky, či jeho opakovatelnost. Následující kapitola se věnuje metrologické návaznosti měřidel neboli vlastnosti výsledku měření, která popisuje referenci, k níž je výsledek vztažen díky dokumentovanému nepřerušovanému řetězci kalibrací, a roli Českého metrologického institutu. Třetí část práce, resp. kapitola pátá pojednává o metodě Monte Carlo, díky níž můžeme vytvořit simulaci procesu, který podléhá náhodným vlivům. Základním východiskem pro tuto metodu je generování pseudonáhodných čísel podle hustoty pravděpodobnosti vstupních veličin, jejich zadání do modelu měření a vypočtení pravděpodobnostní funkce. Navazující kapitola obsahuje samotný popis a přiblížení přístroje pro kalibraci koncových měrek a jeho možné modernizace. Pozornost je zaměřena především na snímače délky a teploty a rovněž na zjednodušení výstupu měřených dat. Poslední dvě nejvíce prakticky orientované kapitoly se zabývají odhadem nejistoty měření pro navrhované řešení modernizace a technickou dokumentací.

Za další možnou zkoumanou oblast předmětné problematiky bych označil vymezení technologických a ekonomických výhod a nevýhod kalibrace koncových měrek pomocí interferometru v komparaci právě s modernizovaným přístrojem Zeiss/Tesa. S ohledem na rozsah a zaměření méj diplomové práce jsem se však tomuto srovnání nevěnoval.

2 MOTIVACE

Již několik desetiletí je kalibrace koncových měrek, a to v rozsahu 125 až 1 000 mm, prováděna na pracovišti ČMI Brno. Příklad Zeiss/Tesa byl do provozu uveden v devadesátých letech a je užíván dodnes. V současné době jej však lze i přes opakované modernizace považovat za technicky zastaralý. Velkou hrozbou představuje skutečnost, že v případě poruchy elektronické části není možné zajistit dodávky náhradních dílů.

Diplomová práce má za cíl provedení analýzy současného technického stavu přístroje Zeiss/Tesa a analýzy požadavků na kalibraci koncových měrek podle ČSN EN ISO 3650. Dále chci provést rešerši realizovatelných technických řešení a výběru vhodných komponentů. V návaznosti bude rozveden návrh nejvhodnějšího řešení modernizace. Součástí praktické části práce bude zjištění kvalifikovaného odhadu nejistoty měření a simulace nejistoty měření metodou Monte Carlo pro navrhovaná řešení modernizace. Závěrečným výstupem práce pak bude vyhotovení technické dokumentace k návrhu modernizace.

3 ZÁKLADNÍ METROLOGICKÉ POJMY A DEFINICE

Metrologie je vědní disciplína, která dopadá a zasahuje téměř do všech oblastí lidského působení. Může být definována jako nauka o měření používaná pro kvantifikaci různých druhů parametrů například v oblasti vědních oborů, technologických procesů, zdravotnictví, ale i mnoha dalších. Mezi obecné úkoly, které jsou zabezpečovány pomocí metrologie, řadíme:

- definování mezinárodně uznávaných měřících jednotek,
- realizaci jednotky za pomoci vědeckých metod, případně etalonu,
- zajištění návaznosti měření. [1]

Podle oblasti zaměření můžeme metrologii rozdělit do tří základních částí:

- **metrologie vědecká** plní nezastupitelnou funkci v širokém spektru aplikačních věd, kde pomáhá při studii základních přírodních zákonů. Můžeme ji tedy považovat za jednu z nejzákladnějších disciplín, která pomáhá porozumět elementárním naturálním procesům, [1]
- **metrologie legální** je částí metrologie, která je aplikována v činnostech souvisejících s dodržováním právními předpisy stanovených požadavků. Tyto požadavky jsou pak obsaženy v normách různé právní síly, tedy v zákonech, nařízeních vlády, ale i v dalších prováděcích právních předpisech, kterými jsou vyhlášky ministerstev či jiných ústředních správních úřadů. Konkrétně pak tyto předpisy obsahují například nároky kladené na měřidla, metody měření atd., [1]
- **metrologie praktická** se používá pro běžné činnosti při aplikaci měřících postupů v dané oblasti. Další úkol plní praktická metrologie v oblasti vytváření a uchování etalonů. [1]

3.1 Definice metrologických termínů

Správné a přesné porozumění metrologickým pojmům a obecně i každé speciální terminologii je velmi důležité pro vzájemnou komunikaci v odborných kruzích. Pro jejich správné použití využíváme definic, jež jsou uvedeny v platných normách a předpisech týkajících se metrologie. Jedním ze základních zdrojů, ze kterého je možné čerpat je Mezinárodní metrologický slovník (TNI 01 0115).

Mezi nejdůležitější pojmy, bez jejichž nadefinování se nelze obejít, bych zařadil:

- **měření:**

Měření zahrnuje různé druhy činností, které jsou prováděny za účelem zjistit hodnotu stanovované veličiny. [2]

- **postup měření:**

Postup měření poskytuje detailní strukturovaný popis činností, které se řídí jedním nebo více principy měření a určenou metodou měření. [2]

- **metoda měření:**

Metoda měření je logickou posloupností činností využívaných pro zjištění měřené veličiny. Existuje několik způsobů rozdělení metod měření, a to například na metody přímé a nepřímé, nebo na metody substituční či diferenční. [2]

- **výsledek měření:**

Výsledek měření je označení pro hodnotu, kterou získáme měřením a která je přisouzená měřené veličině. Tuto hodnotu získáme buď jako přímou indikaci z měřicího přístroje nebo zprůměrováním několika hodnot získaných při splnění podmínek opakovatelnosti. Možným zpřesněním výsledku měření je přidání korekce, jejíž velikost se rovná velikosti systematické chyby s opačným znaménkem. Aby byl výsledek v dnešní době úplný, musí zahrnovat informaci o nejistotě měření. [1]

- **pravá hodnota veličiny:**

Pravá hodnota veličiny, jiným názvem také skutečná hodnota veličiny, představuje takovou velikost veličiny, která je ve shodě s definicí veličiny. Při aplikaci chybového přístupu označujeme pravou hodnotu jako jedinečnou, avšak v praxi nepoznatelnou. Soubor pravých hodnot, který je v praxi taktéž nepoznatelný, připouští nejistotový přístup. [2]

- **konvenční pravá hodnota (veličiny):**

Konvenční pravá hodnota je konvenčně přijatá hodnota definující blíže určenou veličinu, kdy její přesnost je dostačující danému účelu. [1]

- **metrologická confirmace:**

Metrologická confirmace je označení souboru činností, které jsou vykonávány z důvodu zajištění stavu měřidla, v němž je schopné plnit svou funkci používání. Mezi činnosti metrologické confirmace řadíme: kalibraci, justování, plombování, opatření štítkem aj. [1]

- **třída přesnosti:**

Třída přesnosti vytváří možnosti klasifikace jednotlivých měřidel a měřících systémů tak, aby splňovali stanovené metrologické požadavky z důvodu udržení chyb a nejistot měření při stanovených podmínkách ve specifikovaných mezích. [2]

- **rozlišitelnost (indikačního zařízení):**

Rozlišitelnost vyjadřuje kvantitativním způsobem možnosti indikačního zařízení diferencovat blízké hodnoty indikované veličiny. U analogových měřidel je zpravidla dána velikostí jednoho dílku stupnice. Pro digitální měřidla je pak jejich rozlišitelnost definovaná jako hodnota jednoho digitu. [1]

- **opakovatelnost (výsledků měření):**

Opakovatelnost vyjadřuje těsnost shody mezi výsledky po sobě jdoucích měření totožné měřené veličiny, které byly provedeny za identických podmínek měření. Mezi podmínky opakovatelnosti se například řadí stejný postup měření, totožný pozorovatel, stejný měřicí přístroj, stejné místo měření nebo nepřiliš dlouhý časový rozestup mezi opakováním měření. Pro kvantitativní vyjádření opakovatelnosti výsledku měření se používají charakteristiky rozptylu. Mezi nejpoužívanější se řadí směrodatná odchylka nebo rozpětí. [1]

- **reprodukovatelnost (výsledků měření):**

Reprodukovatelností opět rozumíme těsnost shody mezi výsledky měření stejné veličiny, ale oproti opakovatelnosti při rozdílných podmínkách měření. Rozdílné podmínky měření zahrnují změnu principu měření, pozorovatele, metody měření, měřicího přístroje, referenčního etalonu a dalších. Stejně jako u opakovatelnosti i zde jsou charakteristiky rozptylu používány pro kvantitativní vyjádření. [1]

- **justování:**

Justování je pojmenování souboru činností prováděných na měřícím systému pro to, aby systém poskytoval předepsané indikace odpovídající daným hodnotám veličiny. [2]

- **kalibrace:**

Kalibraci definujeme jako soubor činností, kterými za předem specifikovaných podmínek nejprve určíme vztah mezi hodnotami měřené veličiny s nejistotami měření,

jež zjistíme pomocí etalonů a indikacemi s přidruženými nejistotami. V dalším kroku použijeme získaná data k předepsání vztahu pro získání výsledku měření. Tyto činnosti jsou prováděny za účelem výtěžku metrologických vlastností měřících přístrojů, systému či referenčního materiálu. Po úspěšné kalibraci se kalibrované měřidlo označí štítkem a přiloží se k němu kalibrační list. [3]

- **ověření:**

Ověření je posoupnost úkonů, pomocí nichž jsme schopni potvrdit, že měřidlo zařazené do kategorie stanovených splňuje požadované metrologické vlastnosti, přičemž metody ověřování určuje Ministerstvo průmyslu a obchodu prostřednictvím vyhlášky. Ověřovací list nebo úřední značku, jimiž musí být stanovené měřidlo opatřeno, vydává Český metrologický institut nebo autorizovaná metrologická střediska. [3]

- **měřidlo:**

Měřidla jsou zařízení používaná ke zjišťování hodnoty měřené veličiny. Skupinu měřících zařízení můžeme rozdělit na etalony, měřidla pracovní (stanovená), měřidla nestanovená a certifikované referenční materiály. [3]

- **etalon:**

Etalon je měřidlo využívané k realizaci a uchování jednotky nebo stupnice určité veličiny a k jejímu přenesení na měřidla s nižší přesností. Nejvyšší přesnosti dosahují etalony mezinárodní, které jsou používány celosvětově. [3]

- **pracovní měřidla stanovená:**

Pracovní měřidla stanovená jsou měřidla, na jejichž dodržení metrologických vlastností dohlíží z důvodu jejich významu Ministerstvo průmyslu a obchodu za pomoci vyhlášky k povinnému ověřování, a to například v oblasti prodeje, stanovení sankcí, ochrany zdraví či ochrany životního prostředí. [3]

- **pracovní měřidla nestanovená:**

Pracovní měřidla nestanovená jsou měřidla, která neplní funkci etalonu a ani nejsou zařazená do měřidel stanovených. [3]

- **certifikované referenční materiály a ostatní referenční materiály:**

Pojmem certifikované referenční materiály a ostatní referenční materiály rozumíme materiály o přesně definovaných vlastnostech a chemickém složení odůvodněných jejich použitím jako prostředku pro ověření a kalibraci přístrojů, případně pro vyhodnocení vlastností materiálu. [3]

- **největší dovolená chyba (měřidla):**

Největší dovolená chyba představuje hraniční hodnotu chyby daného měřidla, která je stanovena specifikací, normou nebo je garantována jeho výrobcem. Absolutní hodnota měřené veličiny velmi často ovlivňuje největší dovolenou chybu. Pravidlem je, že dosahuje vyšších hodnot, než je samotná rozlišitelnost měřidla, z čehož vyplývá skutečnost, proč na stupnici neodhadujeme zlomky nejmenšího dílku.

$$\delta_m = \pm(A + B \cdot L) \leq C, \quad (1)$$

kde L – hodnota měřené veličiny v mm (případně v m),

A – konstanta zahrnující vliv náhodných chyb,

B – konstanta zahrnující vliv nevyloučených systematických chyb,

C – horní hranice chyby δ_m . [1,4]

- **nejistota měření:**

Nejistota měření je pojmenování nezáporného parametru přidruženého k výsledku měření, který popisuje rozptyl hodnot, jež můžeme přiřadit k dané veličině. Tento parametr nám dává možnost srovnat výsledek měření s ostatními výsledky nebo například etalony. Přes existenci několika způsobů, jakými může být nejistota měření stanovena, je velmi často používána akreditovanými laboratořemi uznávaná metoda známá pod zkratkou GUM (GUM – Guide the expression of uncertainty in measurement). [3]

- **návaznost:**

Zákon o metrologii popisuje návaznost měřidel jako nepřerušenou posloupnost, která zaručuje přenos hodnoty určité veličiny začínající u etalonu nejvyšší metrologické kvality. Tato posloupnost zaručuje koncovému uživateli, že jeho měřidlo má návaznost na nejvyšší mezinárodní úrovni. V České republice mají nejvyšší metrologickou kvalitu etalony státní, na jejichž tvorbu, udržování a rozvoj dohlíží Český metrologický institut. [5]

3.2 Chyby měření

Za předpokladu, že při měření je téměř nemožné se vyhnout jakékoliv nedokonalosti, musíme konstatovat, že každé měření je zatíženo určitým druhem chyby, přičemž ji můžeme klasifikovat podle způsobu jejího vzniku. Mezi nedokonalosti, které měření provází, můžeme zařadit nepřesnost měřících prostředků, různé druhy rušivých vlivů, samotnou nedokonalost lidského fakturu představující při měření velkou roli a mnoho dalších. Chybu lze obecně definovat jako rozdíl mezi pravou hodnotou a hodnotou naměřenou. Jelikož pravou hodnotu měřené veličiny není možno získat, nahrazujeme ji tzv. konvenčně pravou hodnotou. Tato hodnota se dostatečně blíží pravé hodnotě a je získávána pomocí měřících metod, které jsou řádově 3 až 10krát přesnější. Pro vyjádření chyby měření se využívá buď absolutní, nebo relativní forma. [1]

Absolutní chyba představuje rozdíl vznikající při měření mezi výsledkem měření a (konvenčně) pravou hodnotou měření: [1]

$$\Delta = x_m - x_p, \quad (2)$$

kde: x_m je hodnota měřené veličiny zjištěná měřením,
 x_p je (konvenčně) pravá hodnota měřené veličiny.

Relativní chyba je bezrozměrným vyjádřením chyby, jež je definováno jako podíl chyby měření a konvenčně pravé hodnoty měřené veličiny: [1]

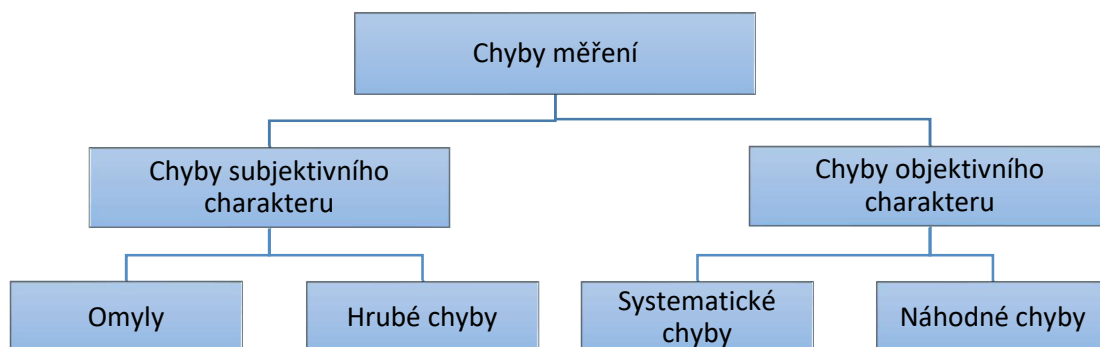
$$\Delta_r = \frac{x_m - x_p}{x_p}, \quad (3)$$

druhým způsobem, jak můžeme relativní chybu zobrazit, je pomocí procent:

$$\Delta_p = \frac{x_m - x_p}{x_p} \cdot 100 [\%]. \quad (4)$$

Tímto způsobem vyjádřená chyba poskytuje objektivnější zhodnocení odchylky od pravé hodnoty v případě, že bereme v úvahu různé druhy aplikace. [1]

Přehledné zobrazení možného dělení chyb měření je znázorněno na obrázku číslo 1 a 2.



Obr. 1) Klasifikace chyb měření [4]

Náhodná chyba δ je popsána jako rozdíl výsledku měření a střední hodnoty, která by byla zjištěna z nekonečného počtu měření, a toto měření by se uskutečnilo za podmínek opakovatelnosti. Jak už název napovídá, jedná se o chyby, jejichž vznik je podmíněn zcela náhodným působením různých faktorů, jako je prostředí, ve kterém měření probíhá, lidský faktor a další. Náhodná chyba patří mezi náhodné veličiny, a z tohoto důvodu se řídí zákony pravděpodobnosti. Obecnou charakteristiku náhodných chyb popisují zákony, které stanoví: [1]

- malé chyby se vyskytují ve větší frekvenci než chyby velké;
- za předpokladu symetrického rozložení chyb je četnost chyb kladných a záporných stejná. [1]

Maximální hodnota náhodné chyby může nabývat nejvýše trojnásobku směrodatné odchylky:

$$\delta_{max} \rightarrow 3s_x. \quad (5)$$

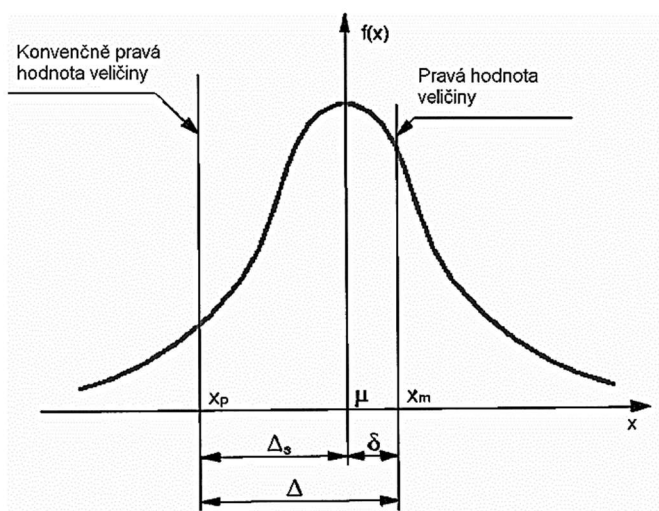
Pro snížení chyby můžeme měření n-krát opakovat a platí:

$$\delta_{max} \rightarrow 3s_{\bar{x}}; \text{ kde } s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}}. \quad (6)$$

Z tohoto vzorce můžeme vyčíst, jakým způsobem se zmenšuje maximální náhodná chyba v závislosti na počtu opakování měření. [1]

Systematická chyba Δs je definovaná jako střední hodnota, která je zjištěna z nekonečného počtu měření stejné měřené veličiny, a to za podmínek opakovatelnosti, od které je následně odečtena pravá hodnota měřené veličiny. V praxi se systematická chyba eliminuje pomocí korekcí, čímž dochází k zpřesnění výsledku. Korekce odpovídá velikostí systematické chyby, avšak s opačným znaménkem. Její hodnotu ale nejde určit zcela přesně, neboť střední hodnotu nahrazujeme pouze odhadem a pravou hodnotu konvenčně pravou hodnotou. I zde platí, že přesnost odhadu střední hodnoty se zvětšuje s rostoucím počtem opakování měření. Mezi typické systematické chyby můžeme zařadit: [1]

- použití nepřesného měřicího přístroje či měřidla,
- zvolení špatné měřicí metody,
- chyba obsluhy,
- chyba vzniklá v důsledku okolního prostředí. [1]



Δ - chyba měření
 Δ_s - systematická chyba
 δ - náhodná chyba
 μ - střední hodnota

Obr. 2) Grafické vyjádření chyb [1]

Hrubá chyba patří do skupiny chyb, které bývají rozpoznatelné díky velké odlišnosti od ostatních hodnot. Tyto chyby jsou lehce odstranitelné. Vznikají například špatným odečtením hodnot, nesprávnou funkcí měřicího zařízení, chybným zápisem hodnot, popřípadě chybou v měřicím postupu. Naměřené hodnoty zatížené tímto typem chyby se ze zpracování výsledků vylučují, aby bylo zabráněno velkému zkreslení konečného výsledku. Výměna měřidla, operátora nebo změna místa měření bývá častým opatřením pro odstranění hrubé chyby. [1]

3.3 Vyjádření nejistoty měření

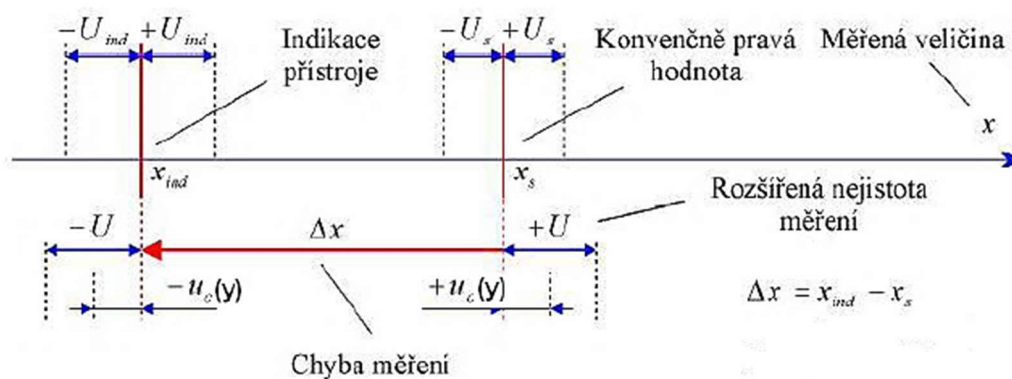
Jak už bylo zmíněno výše, nejistota měření je podle mezinárodního metrologického slovníku definována jako nezáporný parametr sloužící k vyhodnocování měření tím, že charakterizuje rozptýlení hodnot, ve kterém se s určitou pravděpodobností nachází pravá hodnota měřené veličiny. V dnešní době představuje nejistota měření nepostradatelnou součást jakéhokoliv výsledku a bez ní je konečný výsledek hodnocen jako neúplný. Jasně principy a požadavky při vyjadřování nejistot popisuje dokument EA 4/02 *Vyjádřování nejistot měření při kalibracích*. Slouží jako pomůcka zejména pro akreditační laboratoře, které mají povinnost stanovenou normami, právními předpisy a směrnicemi evropských institucí nejistotu například při kalibraci či ověření jednoznačně vyjádřit. Konečný výsledek může být zapsán ve tvaru rovnice: [6]

$$Y = y \pm U, \quad (7)$$

kde: Y vyjadřuje skutečnou hodnotu veličiny,
 y je označení naměřené hodnoty dané veličiny,
 U je výsledná nejistota. [6]

Skutečná hodnota zde vyjadřuje jakýsi pomyslný střed intervalu, ve kterém pravá hodnota měřené veličiny s pravděpodobností, jejíž hodnota zaleží na koeficientu rozšíření, leží.

Zavedení nejistoty měření do běžné praxe kalibračních laboratoří proběhlo v relativně nedávné době, a to přibližně po vydání dokumentu WECC 19/90 v roce 1990. Tento dokument byl jedním z prvních jednotlicích předpisů pro nejistoty, který vytvářel závazek pro akreditované laboratoře v rámci Západoevropského kalibračního sdružení (WECC). Nedostatečnost výsledku bez uvedené nejistoty potom přinesl dokument Guide the expression of uncertainty in measurement (GUM), který byl v roce 1993 vydán organizací International Organization for Standardization. Pro grafické znázornění vztahu mezi nejistotou a chybou měření můžeme použít i výsledek měření při kalibraci: [6,7]



Obr. 3) Znázornění nejistot ve výsledcích měření [7]

Popisek:

Δx - chyba měření;

x_{ind} - indikace zkoušeného přístroje;

x_s - konvenčně pravá hodnota;

U_{ind} - rozšířená nejistota indikace zkoušeného měřidla;

U_s - rozšířená nejistota konvenčně pravé hodnoty;

U - rozšířená nejistota měření;

$u_c(y)$ - standardní kombinovaná nejistota chyby měření ($2 \cdot u_c = U_c$);

$u_{x_{ind}}$ - standardní nejistota hodnoty x_{ind} ;

u_{x_s} - standardní nejistota hodnoty x_s . [7]

Rozlišujeme čtyři hlavní typy nejistot výsledku měření:

- nejistota typu A,
- nejistota typu B,
- kombinovaná nejistota,
- rozšířená nejistota.

Pro stanovení kombinovaných a rozšířených nejistot využíváme různých postupů, a to v závislosti, zda se jedná o měření přímé nebo nepřímé. V mém případě se jedná o měření koncových měrek, což je měření přímé, a proto dále podrobněji popíši právě tento postup. [6]

3.3.1 Stanovení standardní nejistoty typu A

Určení standardní nejistoty typu A je založeno na statistické analýze ze série naměřených hodnot. Důležitým faktorem pro získání relevantního souboru dat k následnému vyhodnocování je dodržení stejných podmínek při opakování měření. Další podmínkou je zvolit dostatečnou rozlišitelnost měřidla pro to, aby rozptyl naměřených hodnot byl rozpoznatelný.

V prvním kroku musíme stanovit odhad měřené hodnoty veličiny X , který je určen výběrovým průměrem z naměřených hodnot x_1, x_2, \dots, x_n . Výběrový průměr je definován dle vztahu: [6]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (8)$$

Charakteristiku rozptýlení naměřených představuje výběrová směrodatná odchylka, kterou je možno vypočítat dle vztahu: [6]

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}. \quad (9)$$

Jelikož pro určování odhadu hodnoty měřené veličiny používáme náhodného výběru, má výběrový průměr také náhodný charakter. Proto pro popis rozptýlení hodnot použijeme výběrový rozptyl průměru definovaný vztahem: [6]

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{s_x^2}{n}. \quad (10)$$

Jeho druhým (kladným) odmocněním potom dostáváme výběrovou směrodatnou odchylku průměru, jež představuje charakteristiku rozptylu hodnot výběrových průměrů, a z tohoto důvodu je zvolena jako míra nejistoty výběrového průměru \bar{x} . [6]

Výběrová směrodatná odchylka průměru je v tomto případě považována za standardní nejistotu typu A: [6]

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} = u_A(x). \quad (11)$$

Pro spolehlivost a platnost tohoto vztahu odhadu standardní nejistoty typu A je nutné, aby počet provedených opakovaných měření byl větší než 10 ($n > 10$). V případě, že tuto podmínku nejsme schopni dodržet, musíme vzít v úvahu korekci, která zohledňuje malý počet měření. Korekci provedeme dle vztahu: [6]

$$u_A(x) = k_s s_{\bar{x}}, \quad (12)$$

kde k_s představuje koeficient, upravující výslednou hodnotu standardní nejistoty typu A, jehož hodnota je volena podle počtu měření n . Konkrétní hodnoty jsou zobrazeny v následující tabulce. [4]

Tab 1) Koeficienty v závislosti na počtu měření ($n < 10$) [4]

N	2	3	4	5	6	7	8	9
k_s	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2

3.3.2 Stanovení standardní nejistoty typu B

Při stanovování standardní nejistoty typu B se řídíme zcela jiným postupem než pouze statistickým vyhodnocením série pozorování. V tomto případě je proces založen na odborných znalostech a širokém spektru dostupných informací o možné variabilitě veličiny. Mezi tyto informace můžeme zařadit:

- údaje z předchozích měření,
- údaje poskytnuté výrobcem,
- informace zapsané v kalibračních listech či jiných certifikátech,
- zkušenosti, které jsme získali používáním příslušných materiálů a zařízení,
- údaje z odborné literatury,
- informace o metodách měření. [1,4]

V dnešní době, kdy pro většinu případů měření slouží jako výstup vhodnými převodníky převedený elektrický signál, můžeme rozlišit několik oblastí zdrojů nejistot:

Vlivy přidružené použitým přístrojům, etalonům a dalšímu vybavení:

- nejistoty vzniklé při kalibraci nebo ověření,
- stabilita (časová specifikace) přístrojů,
- dynamické chyby přístrojů,
- zanedbané systematické chyby,
- vnitřní tření v přístrojích,
- hystereze, mrtvý chod,
- rozlišitelnosti přístrojů případně rozlišení odečtu z přístrojů,
- specifikace výměnných částí přístrojů. [1,4]

Vlivy zapříčiněné okolním prostředím a jeho změnami:

- tlak, změna tlaku,
- relativní vlhkost,
- elektrické pole,
- magnetické pole,
- osvětlení, jeho frekvence a tepelné vyzařování,
- hustota vzduchu,
- čistota prostředí,
- napájecí napětí, stabilita, frekvence, harmonické zkreslení,
- zemní smyčky. [1,4]

Vlivy metody:

- ztráty, svodové proudy,
- interakce s měřeným předmětem,
- nejistoty použitých konstant,
- vlivy reálných parametrů,
- vlastní ohřev,
- odvod či přestup tepla. [1,4]

Vlivy operátora:

- nedodržení příruček,
- paralaxa,
- elektrostatické pole,
- tepelné vyzařování,
- osobní návyky. [1,4]

Ostatní vlivy:

- chyby při odečtech nebo zápisu hodnot,
- globální vlivy (např. denní doby, ročních období apod.). [1,4]

Při zjišťování standardní nejistoty typu B postupujeme následujícím způsobem: [4]

- 1) určíme všechny možné zdroje nejistot Z_1, Z_2, \dots, Z_n ,
- 2) odhadneme maximální rozsah odchylky j -tého zdroje nejistoty $\pm z_{jmax}$ a pomocí daného vzorce určíme příspěvek jednotlivých zdrojů nejistot $u_B(z_j)$ jako:

$$u_B(z_j) = \frac{z_{jmax}}{\kappa}, \quad (13)$$

kde κ vyjadřuje součinitel, který vychází ze zákona rozdělení, do něhož byl daný zdroj nejistoty zařazen. Pro normální (Gaussovo) rozdělení nabývá κ hodnoty 2, popřípadě 3, pro rovnoměrné rozdělení je potom $\kappa = 3$.

V případech, kdy je hodnota standardní nejistoty známa (např. od výrobce), vycházíme z upraveného vztahu: [4]

$$u_B(z_j) = \frac{U}{\kappa} \quad (14)$$

kde κ , stejně jako v předchozím případě, představuje součinitel determinovaný druhem rozdělení a U je hodnota standardní rozšířené nejistoty, která byla zjištěna z informací poskytnutých výrobcem nebo například z kalibračního listu. [4]

Výslednou nejistotu potom určíme jako geometrický součet jednotlivých zdrojů nejistot podle vztahu: [4]

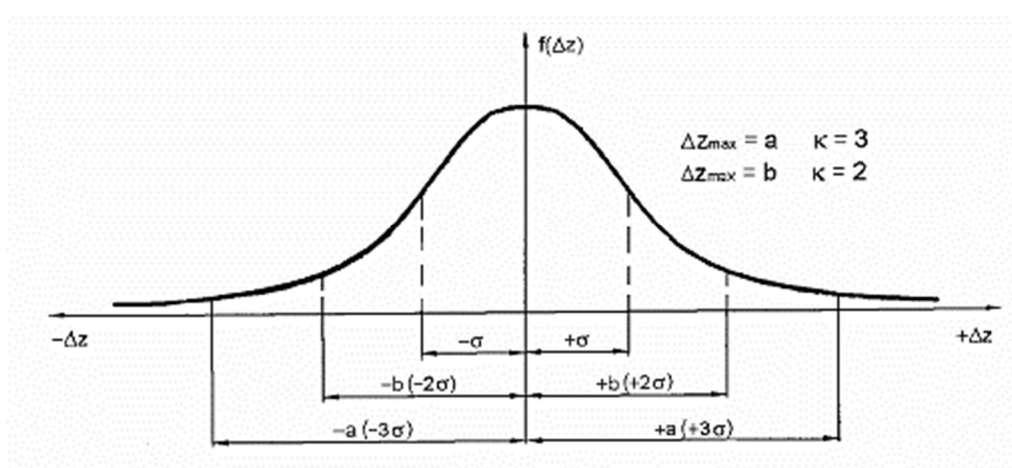
$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^n A_j^2 u_B^2(z_j)}, \quad (15)$$

kde: $u_B(z_j)$ jsou nejistoty přidružené k jednotlivým zdrojům,
 A_j jsou jejich součinitelé citlivosti.

Důležitou součástí při výpočtu standardní nejistoty typu B je rozhodnutí o rozdělení pravděpodobnosti, se kterou jednotlivé zdroje nejistot nabývají daných hodnot mezi svými známými krajními mezemi. Toto rozhodnutí je nutné učinit z důvodu potřeby směrodatné odchylky, která odpovídá určitému rozdělení pravděpodobnosti. [4]

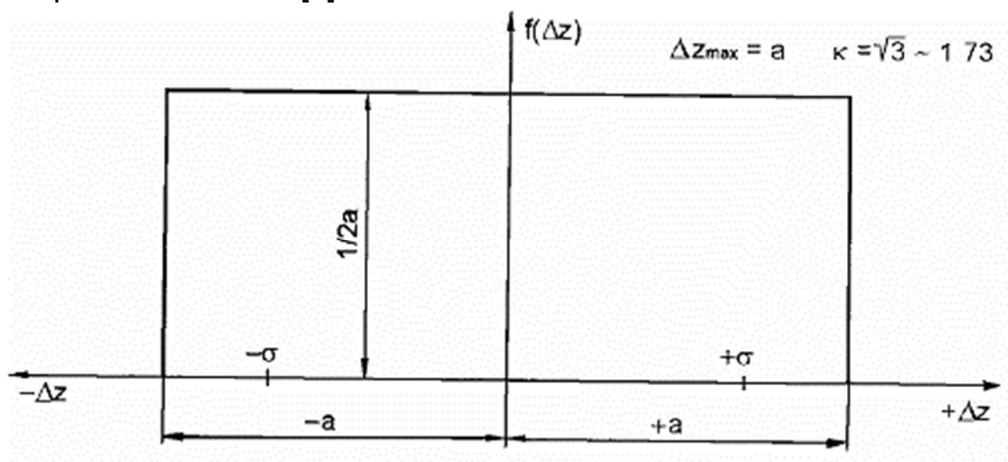
Normální rozdělení (viz obrázek č. 4) předpokládá vysokou pravděpodobnost malých odchylek, na rozdíl od odchylek velkých, jejichž pravděpodobnost rychle klesá. S normálním rozdělením se také počítá ve výpočtu standardní nejistoty typu A či kombinované standardní nejistoty. [4]

Rozdělení se též předpokládá pro výsledek výpočtu nejistoty typu A, případně pro výsledek výpočtu kombinované standardní nejistoty (kdy podle limitní věty má rozdělení vzniklé složením několika obecných rozdělení charakter normálního rozdělení). [4]



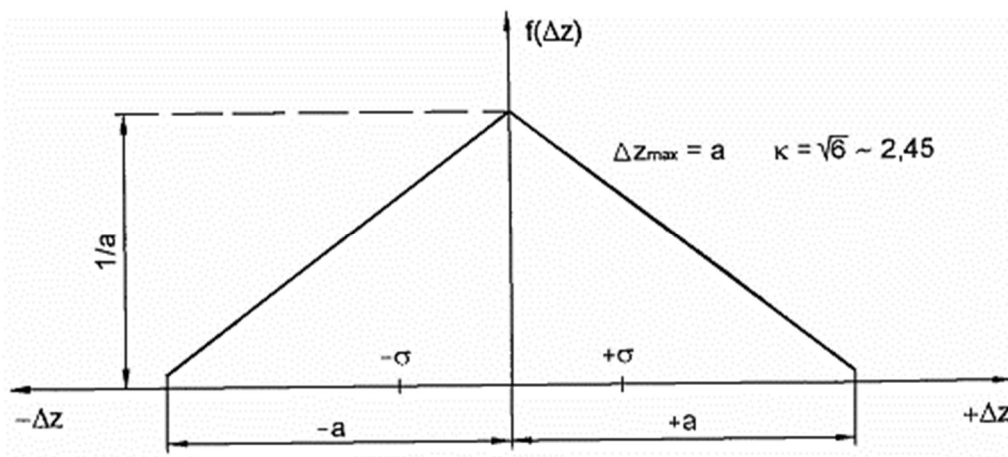
Obr. 4) Normální rozdělení [4]

Použití rovnoměrného rozdělení představuje dostatečné statistické vyjádření, jestliže nemáme dostatečné informace o měřené veličině (viz obrázek č. 5). Hodnota zdroje nejistoty může ležet kdekoli v intervalu rozsahu odchylky, aniž by byla kterákoli hodnota upřednostňována. [4]



Obr. 5) Rovnoměrné rozdělení [4]

Trojúhelníkové rozdělení znázorněné na obrázku č. 6 je vhodné použít v situaci, kdy víme, že pravděpodobnost výskytu je kumulována v okolí středu intervalu. Simpsonovo rozdělení bývá používáno například při specifikaci stability v době mezi kalibracemi, a to za předpokladu že skutečné chyby jsou výrazně nižší, než jak je uvádí výrobce. [4]



Obr. 6) Trojúhelníkové rozdělení [4]

3.3.3 Kombinovaná nejistota měření

V běžné praxi si jen velmi zřídka vystačíme pouze s jedním typem nejistoty měření. Mnohem častěji dochází ke stanovení kombinované nejistoty měření, která je tvořena kombinací obou standardních nejistot měření nebo součtem dílčích složek nejistoty měření.

Druhý jmenovaný způsob stanovení kombinované nejistoty využívá Gaussova zákona šíření nejistoty, který může být popsán vztahem: [7]

$$u_y^2(x) = \sum_{j=1}^m A_j^2 u_{x_j}^2. \quad (16)$$

Pokud máme měřenou veličinu popsanou modelem $X = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, pak se výsledek měření stanoví jako kombinace standardních nejistot odhadů vstupů x_1, x_2, \dots, x_n , kde x je odhad měřené veličiny X .

Kombinovaná standardní nejistota odhadu x pro nekorelované vstupní veličiny je rovna kladné hodnotě druhé odmocniny kombinovaného rozptylu, který získáme ze vztahu: [7]

$$u_c^2(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i). \quad (17)$$

Jednodušším způsobem vyjádření výsledné kombinované standardní nejistoty výsledku měření může být geometrický součet standardní nejistoty typu A a standardní nejistoty typu B, který je stejně jako předchozí vztah odvozen z Gaussova zákona šíření nejistot. Tento geometrický součet je popsán vzorcem: [7]

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)}. \quad (18)$$

Pravděpodobnost kombinované standardní nejistoty měření u_c , jež byla stanovena předchozím postupem, je 68,3 % (koeficient rozšíření $k = 1$). Jestliže chceme, aby vypočtená nejistota měření byla s jinou pravděpodobností, musíme změnit koeficient rozšíření daného rozdělení (viz další kapitola). [1]

3.3.4 Rozšířená nejistota měření

Uvedený postup pro získání kombinované standardní nejistoty zahrnuje použití hodnot směrodatných odchylek, ze kterých byla tato nejistota složena. Jestliže budeme považovat rozdělení tímto způsobem určené nejistoty za normální, je zřejmé, že výsledná nejistota bude pokrývat zhruba 68,3 % z možných variant výsledku. Což představuje velkou šanci, že výsledek měření bude mimo stanovený interval nejistot.

Pro stanovení výsledku s vyšší pravděpodobností přistupujeme k možnosti vynásobení standardní nejistoty měření koeficientem rozšíření. V současné době se nejvíce využívá zjednodušeného postupu určení koeficientu rozšíření, který je dohodnut podle určité odhadované pravděpodobnosti pokrytí výsledků měření (viz Tab 2). [4,7]

Tab 2) Koeficienty rozšíření

Koeficient rozšíření k	Pravděpodobnost p
1	68 %
2	95 %
2,58	99 %
3	99,7 %

Rozšířenou nejistotu měření získáme ze vztahu: [4]

$$U = k \cdot u_c(x). \quad (19)$$

V praxi je tento postup široce zastoupen, ale je možný jen v případě splnění podmínek předpokladu normálního rozdělení standardní nejistoty. Mezi tyto podmínky se řadí:

- odhad x měřené veličiny X je získán z odhadu vstupu x_1, x_2, \dots, x_n , za situace, kdy mohou být popsány vhodnými typy rozdělení (normální, obdélníkové);
- nejistoty typu A nebo B přispívají srovnatelně ke kombinované standardní nejistotě $u_c(x)$;
- při použití zákona šíření nejistot je lineární aproximace dostatečná;
- nejistota $u_c(x)$ je dostatečně malá, a to z důvodu významnosti jejích efektivních stupňů volnosti ν_{eff} . [4,7]

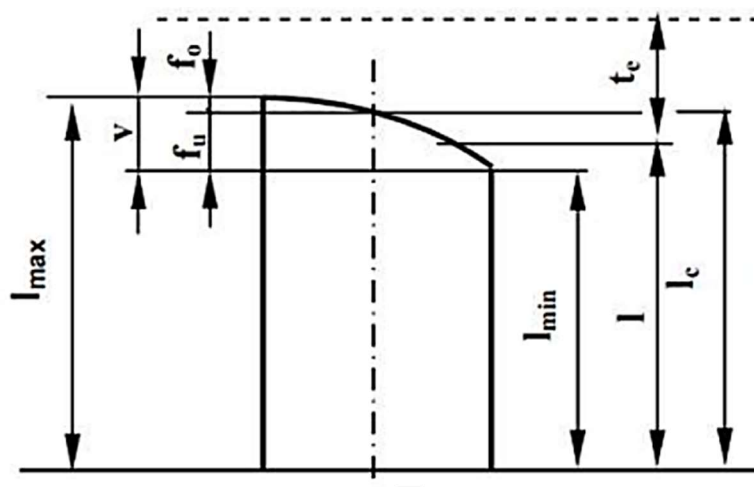
3.4 Koncové měrky

Jedna ze základních skupin délkových měřidel je tvořena koncovými měrkami, které představují ztělesnění určité míry. Do oblasti měřicí techniky byly zavedeny C. E. Johanssonem koncem minulého století. Daná délka je definována jako vzdálenost dvou vodorovných ploch, jež jsou broušeny a lapovány. Ve většině případů mají měrky hranolový tvar, jejichž průřez se liší podle jejich délky (9x30 mm do jmenovité délky 10,5 mm; 9x35 mm nad 10,5 mm jmenovité délky). Sada koncových měrek do délky 100 mm je zobrazena na obrázku č. 7. Klíčové metrologické a konstrukční vlastnosti koncových měrek stanovuje norma ČSN EN ISO 3650, která je považována za všeobecnou normu geometrických požadavků na výrobky. [8]



Obr. 7) Sada koncových měrek do 100 mm [9]

Koncové měrky mohou být popsány několika rozměry, přičemž jejich polohu zobrazuje obrázek č. 8.



Obr. 8) Rozměry koncových měrek [1]

Legenda:

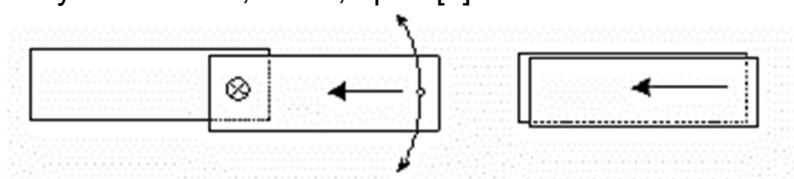
Délka koncové měrky l – vyjadřuje kolmou vzdálenost mezi určitým bodem měřící plochy a plochy pomocné rovinné destičky, která je vyrobena ze stejného materiálu jako měrka. Navzájem jsou spojeny pomocí nasunutí.

Středová délka koncové měrky l_c – délka měřená ze středu volně přístupné měřící plochy.

Rozpětí délek v – popisuje rozdíl, který vzniká mezi největší délkou koncové měrky l_{max} a nejmenší délkou l_{min} . Toto rozpětí můžeme také získat jako součet úchylek f_0 a f_u od středové délky l_c . Tyto parametry jsou však při kalibraci málokdy používány, protože jsou zastoupeny rozpětím délek.

Tolerance jmenovité délky t_e – definuje maximální dovolenou úchylku od jmenovité délky koncové měrky. [1]

Jedním z důvodů, proč je kladen velký důraz na precizní opracování měřících ploch ve smyslu drsnosti ploch, rovinnosti nebo vzájemné rovnoběžnosti, je možnost jejich spojení tzv. nasátí. Za stálého tlaku se očištěné plochy nasunou přes sebe, čímž dojde k vytlačení vzduchu mezi nimi, až následně začnou působit mezi molekulami jednotlivých ploch přitažlivé síly o velikosti až 1000 N. Postup, kterým se při spojování měrek řídíme, je naznačen na obrázku č. 9. Nepřesnost ve styku dvou měrek může zapříčinit délkovou chybu zhruba 0,1 až 0,2 μm . [1]



Obr. 9) Schéma postupu nasávání koncových měrek [1]

Mezi hlavní formy využití koncových měrek patří:

- tvorba etalonů délky,
- prostředek při nastavování a ověřování měřících prostředků,
- prostředek pro přímé ověřování délkových rozměrů průmyslových výrobků. [8]

Mezinárodní norma ČSN EN ISO 3650 definuje 4 třídy koncových měrek podle jejich přesnosti:

- K - použití pro kalibraci,
- 0 - téměř výhradní použití pro etalony,
- 1 - použití jako etalon nebo pracovní měřidlo,
- 2 - kontrola posuvných a mikrometrických měřidel apod. [8]

Rozdíly mezi jednotlivými přesnostmi mohou být vyjádřeny pomocí maximální dovolené úchyly jmenovité délky t_e v libovolném bodě měřící plochy a tolerance t_v pro rozpětí délky. Konkrétní hodnoty zobrazuje tabulka č. 3.

Tab 3) Tolerované úchyly jmenovité délky t_e a tolerance t_v pro rozpětí délky [8]

Jmenovitá délka l_n [mm]	Kalibr. třída K		Třída 0		Třída 1		Třída 2	
	$\pm t_e$ [μm]	$\pm t_v$ [μm]	$\pm t_e$ [μm]	$\pm t_v$ [μm]	$\pm t_e$ [μm]	$\pm t_v$ [μm]	$\pm t_e$ [μm]	$\pm t_v$ [μm]
$0,5 \leq l_n \leq 10$	0,2	0,05	0,12	0,1	0,2	0,16	0,45	0,3
$10 < l_n \leq 25$	0,3	0,05	0,14	0,1	0,3	0,16	0,6	0,3
$25 < l_n \leq 50$	0,4	0,06	0,2	0,1	0,4	0,18	0,8	0,3
$50 < l_n \leq 75$	0,5	0,06	0,25	0,12	0,5	0,18	1	0,35
$75 < l_n \leq 100$	0,6	0,07	0,3	0,12	0,6	0,2	1,2	0,35
$100 < l_n \leq 150$	0,8	0,08	0,4	0,14	0,8	0,2	1,6	0,4
$150 < l_n \leq 200$	1,0	0,09	0,5	0,16	1	0,25	2	0,4
$200 < l_n \leq 250$	1,2	0,1	0,6	0,16	1,2	0,25	2,4	0,45
$250 < l_n \leq 300$	1,4	0,1	0,7	0,18	1,4	0,25	2,8	0,5
$300 < l_n \leq 400$	1,8	0,12	0,9	0,2	1,8	0,3	3,6	0,5
$400 < l_n \leq 500$	2,2	0,14	1,1	0,25	2,2	0,35	4,4	0,6
$500 < l_n \leq 600$	2,6	0,6	1,3	0,25	2,6	0,4	5	0,7
$600 < l_n \leq 700$	3,0	0,18	1,5	0,3	3	0,45	6	0,7
$700 < l_n \leq 800$	3,4	0,2	1,7	0,3	3,4	0,5	6,5	0,8
$800 < l_n \leq 900$	3,8	0,2	1,9	0,35	3,8	0,5	7,5	0,9
$900 < l_n \leq 1000$	4,2	0,25	2	0,4	4,2	0,6	8	1

Měrky musí být označeny jmenovitou délkou v milimetrech a při uvedení třídy přesnosti je použita specifikovaná značka. Pro koncové měrky s délkou nad 100 mm platí povinnost opatřit je značkami, jež značí místo podpory ($0,211 \times l_n$ od měřících ploch). [8]

Velmi důležitou roli při výrobě měrek hraje volba správného materiálu, který musí splňovat množství požadavků na něj kladených. Mezi tyto požadavky se řadí:

- vysoká tvrdost,
- dobrá odolnost proti opotřebení,
- vysoká míra korozivzdornosti,
- stabilita rozměrů,
- schopnost možnosti nasátí,
- nízký koeficient délkové roztažnosti. [8]

V současné době je v České republice nejpoužívanějším materiálem nástrojová ocel ČSN 19 422. Tato ocel splňuje všechny požadavky s výjimkou odolnosti proti korozi. Právě proto je stanovena povinnost použití rukavic při práci s ocelovými měrkami a následné provedení jejich konzervace (zejména funkčních ploch). Dalším využívaným materiálem je keramika, konkrétně ve formě oxidu zirkoničitého, mezi jehož typické vlastnosti patří vysoká otěruvzdornost, tvrdost, stálost rozměrů a v porovnání s nástrojovou ocelí 100% korozivzdornost. Pro svou vysokou tvrdost a otěruvzdornost nachází ve výrobě měrek své místo i karbid wolframu (WC). [8]

Metrologické požadavky

Tolerance rovinnosti t_f – úchylka rovinnosti f_d měřících ploch nesmí překročit příslušné tolerance stanovené tabulkou č. 4.

Tab 4) Tolerance rovinnosti [8]

Jmenovitá délka l_n [mm]	Tolerance rovinnosti t_f [μm]			
	Třída			
	k	0	1	2
$0,5 \leq l_n \leq 150$	0,05	0,1	0,15	0,25
$150 < l_n \leq 500$	0,1	0,15	0,18	0,25
$500 < l_n \leq 1000$	0,15	0,18	0,2	0,25

Měřící plochy musí umožňovat přilnutí nasunutím, přičemž drobné škrábance jsou přijatelné jen v případě, že nesnižují jejich přilnavost. Druhým parametrem je maximální hodnota 0,3 mm poloměru zaoblení hran. Mezi další vlastnosti specifikované normou patří rovinnost, rovnoběžnost a kolmost bočních ploch. [8]

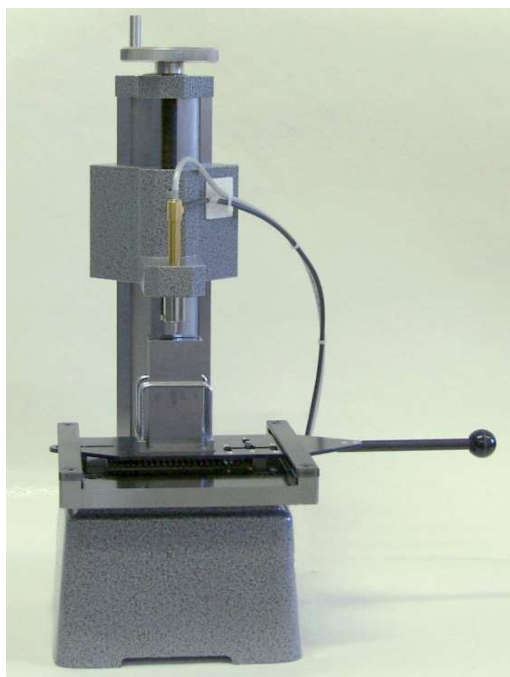
Referenční poloha koncových měrek se liší podle toho, zda pracujeme s měrkami pod nebo nad 100 mm jmenovité délky. V prvně jmenovaném případě jsou měrky umístěny do svislé polohy s měřícími plochami ve vodorovné poloze. Pro délky nad 100 mm je poloha přesně opačná, kdy přibyla nutnost použití vhodných podpor ve vzdálenosti 0,211 násobku jmenovité délky, aby nedocházelo k průhybu měrky. Místa, do nichž se tyto podpory umísťují, se též nazývají Besselovy body. Samozřejmostí je vyloučení jakéhokoli namáhání měrky. [8]

Neméně důležitou oblastí je stanovení referenční teploty a tlaku. Přičemž norma ČSN EN ISO 3650 uvádí, že jmenovitý rozměr měrek je vázán k referenční teplotě 20 °C a tlaku 101325 Pa (normální atmosférický tlak). [8]

Závěrečné kapitoly normy se potom věnují vlastní kalibraci koncových měrek. Existují dva základní přístupy k měření, které můžeme využít, a to metoda interferenční a metoda porovnávací (komparační). Bez ohledu na to, jakou metodu zvolíme, je nutné provést zkoušku přilnavosti, která nám zaručí, že měřicí plochy měrky vykazují schopnost přilnutí. K této zkoušce je přidružena kontrola využívající optickou destičku pro vyloučení interferenčních pruhů, barevných či lesklých skvrn, jež by se na plochách mohly vyskytovat. [8]

Kalibrace pomocí interferometru je určena primárně pro měrky patřící do nejvyšší kalibrační třídy K. Pro zvýšení přesnosti výsledku měření se potom berou v potaz korekce, ty zohledňují vlivy obecné (společné i pro komparační metodu) jako je teplota, atmosférický tlak nebo vlhkost, ale i významné vlivy charakteristické pro interferometr. Mezi ně patří nastavení velikosti clony a ohniskové vzdálenosti interferometru nebo struktura povrchu a změny optické fáze na odraz světelné vlny. [8]

Metoda, která je v praxi využívanější a také levnější na pořízení, je metoda porovnávací, je využívána i v našem případě. Pro stanovení délky koncové měrky dochází k určení rozdílu mezi středovou délkou referenční koncové měrky a měrky měření. Stojánek Mesing, který slouží ke kalibraci koncových měrek do délky 100 mm je znázorněn obrázkem č. 10. Na referenční měrku je kladen požadavek na způsob její kalibrace, která se děje buď přímo interferenčně, nebo pomocí jejího navázání porovnávacími měřeními na měrku měřenou interferenčně. Tento typ měření je používán i pro zjištění rozpětí délky, které je specifikováno rozdílem čtení mezi středem a čtyřmi rohy měřicí plochy, nacházející se 1,5 mm od ploch bočních. Při využití jiných než rohových bodů, musí být jejich poloha popsána. [8]

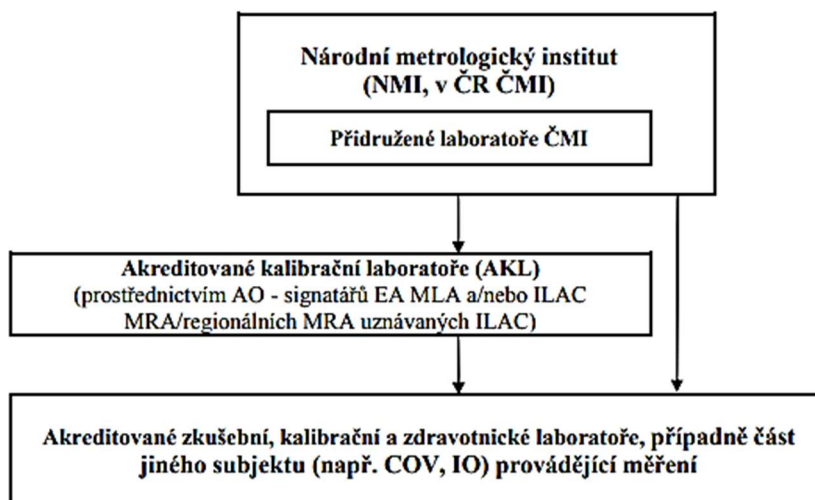


Obr. 10) Stojánek Mesing na kalibraci koncových měrek do 100 mm [10]

4 METROLOGICKÁ NÁVAZNOST MĚŘIDEL

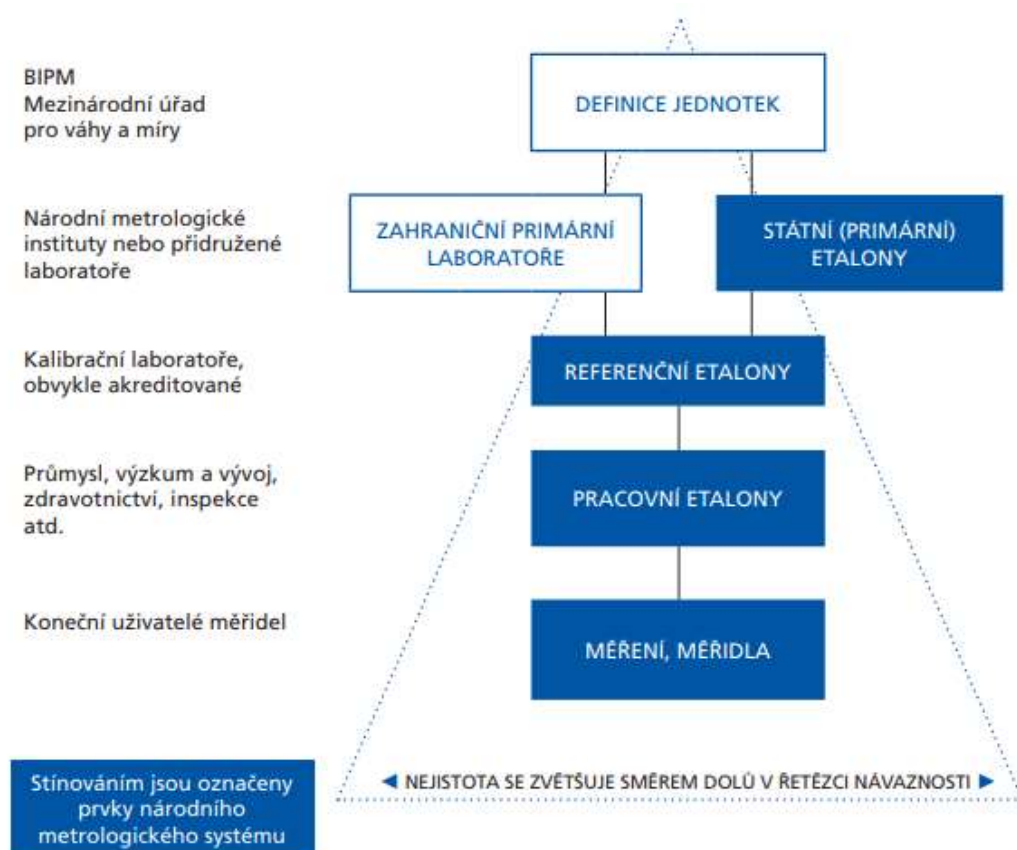
S rostoucími nároky na kvalitu výrobků a služeb vzrůstá také důležitost přesného a spolehlivého měření. Tato skutečnost se výrazně projevuje v příslušných zákonech a normách, jež charakterizují požadavky na návaznost měřidel pro státní a mezinárodní etalony. Pojem metrologická návaznost měření je definován jako vlastnost výsledku měření, která popisuje referenci, k níž je výsledek vztažen díky dokumentovanému nepřerušovanému řetězci kalibrací. Každá provedená kalibrace se svým dílem podílí na výsledné stanovené nejistotě měření. Politika ILAC-P10:01/2013 pro návaznost výsledků měření tvoří rámec, podle kterého se řídí akreditované laboratoře. Roli národního metrologického institutu plní Český metrologický institut (ČMI), který v kooperaci se svými přidruženými laboratořemi zajišťuje správnost měření v oborech technické, vědecké a hospodářské činnosti. Český institut pro akreditaci nařizuje, aby měření potřebná pro provedení kalibrace, zkoušky nebo vyšetření byla ve všech možných případech návazná na státní, popřípadě mezinárodní etalon nebo na certifikované referenční materiály vyrobené národním metrologickým institutem. [11]

Návaznost v České republice je realizována formou, jež představuje obrázek č. 11.



Obr. 11) Způsob realizace metrologické návaznosti platný pro laboratoře v ČR [11]

Řetězec návaznosti, jež je zobrazen na obrázku č. 12, představuje nepřerušovaný řetězec porovnání, pro který jsou známy nejistoty. Takto zavedený metrologický systém zajišťuje vztah výsledku měření nebo hodnoty etalonu s referencemi vyšší úrovně končící až u primárních etalonů. Tímto způsobem je umožněna návaznost na nejvyšší mezinárodní úrovni, zabezpečená prostřednictvím národního metrologického institutu nebo akreditované kalibrační laboratoře, pro koncové uživatele. Díky mezinárodním dohodám o vzájemném uznávání je možnost zajištění návaznosti i pomocí laboratoří sídlících v zahraničí. [12]



Obr. 12) Řetězec metrologické návaznosti [12]

Na samotném vrcholu pomyslné pyramidy stojí etalony státní, které byly vytvořeny rozhodnutím státu proto, aby v dané zemi plnily funkci základu pro přiřazování hodnot jiným etalonům dané veličiny. Státní etalony České republiky jsou navázány na etalony mezinárodní a zajišťují přesnost měření na území celého státu. Při postupu v řetězci dolů narážíme na etalony referenční a pracovní, u nichž dochází k jistému zvětšení nejistoty měření.

Zajištění návaznosti je založeno na kalibraci měřidel, měřících systémů nebo referenčních materiálů, která umožňuje určení metrologických vlastností přístroje, systému nebo referenčního materiálu. Nejčastěji se daného dosahuje přímým porovnáním s etalony nebo certifikovanými referenčními materiály. Na konci se ke kalibrovanému měřidlu přidá kalibrační list a opatří se štítkem. [12]

Na kalibrační listy jsou kladeny požadavky, zejména na jeho obsah, formou normy ČSN EN ISO/IEC 17025. Jestliže nastane situace, kdy laboratoř zjistí chybné vydání výsledků kalibrace, má povinnost o této chybě informovat dotčeného zákazníka, zajistit odebrání vydaných kalibračních listů a vydat upravené kalibrační listy. [11]

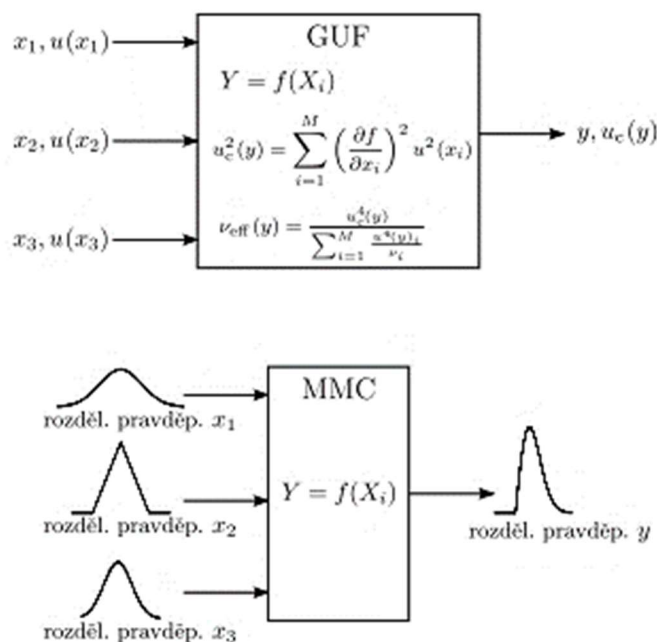
5 METODA MONTE CARLO

5.1 Princip a využití metody MONTE CARLO

V případě, že potřebujeme popsat proces nebo systém, který podléhá náhodným vlivům, je jednou z možností vytvořit simulaci těchto procesů a systémů. Metoda Monte Carlo (MMC) je ve většině případů vhodnou volbou pro vytvoření takové simulace. Jako hlavní princip této metody můžeme označit generování náhodných, respektive pseudonáhodných čísel podle hustoty pravděpodobnosti vstupních veličin, jejich zadání do modelu měření a vypočtení pravděpodobnostní funkce.

První zmínka o metodě Monte Carlo pochází z osmnáctého století a je spojena s tzv. Buffonovou úlohou. Avšak jako tvůrci metody jsou označeni John von Neumann, Stanislaw Ulam a Nicholas Metropolis, kteří metodu poprvé použili při vývoji atomové bomby v Los Alamos roku 1940. Jejich úkolem bylo zjistit, jakým způsobem se chová neutron při průniku libovolnou látkou. Vycházeli přitom z předpokladu, že při srážce neutronu s atomem vodíku dojde k pohlcení neutronu v průměru v jednom ze sta případů. Pro simulaci tohoto jevu použili ruletu rozdělenou na sto políček, přičemž jen jedno políčko znamenalo simulované pohlcení neutronu. V ostatních případech neutron pokračuje v pohybu, kdy směr, rychlost a další charakterizující informace byly součástí navazujících simulací. [13,14]

V metrologickém prostředí je jedním ze základních dokumentů Guide to The Expression of Uncertainty In Measurement (GUM), ve kterém je popsán postup pro výpočet a vyjádření nejistot měření, často nazývaný GUM Uncertainty Framework (GUF). Z důvodu mnoha omezení, která tento postup obsahuje, byl vydán dodatek dokumentu GUM, který uvádí, jak lze využít MMC pro zjištění nejistot. Rozdílnost obou metod vyjadřují i odlišné vstupní a výstupní veličiny. U metody GUF je potřeba znát střední hodnoty vstupních veličin x_i , jejich nejistoty $u(x_i)$ a stupeň volnosti $v(x_i)$. Výsledkem GUF je potom střední hodnota y , nejistota $u(y)$ a stupeň volnosti $v(y)$. Naproti tomu pro použití MMC potřebujeme znát hustoty pravděpodobnosti vstupních veličin a výsledkem je pravděpodobnostní funkce výstupní veličiny. Schéma vyjadřující tyto odlišnosti je zobrazeno na obrázku č. 13. [13,14]



Obr. 13) Porovnání vstupních a výstupních údajů metod GUF a MMC [13]

Mezi hlavní výhody MMC jistě patří možnost počítat nejistoty i v případech komplikovaného rozdělení vstupních veličin, možnost zahrnutí do výpočtu také komplexní čísla a snadná implementace na různé modely. [14]

Možnosti využití metody Monte Carlo:

- řešení diferenciálních rovnic,
- počítání určitých integrálů,
- simulace experimentů, převážně: štěpné reakce,
difuze plynů,
proudění tekutin

• výpočet nejistot.

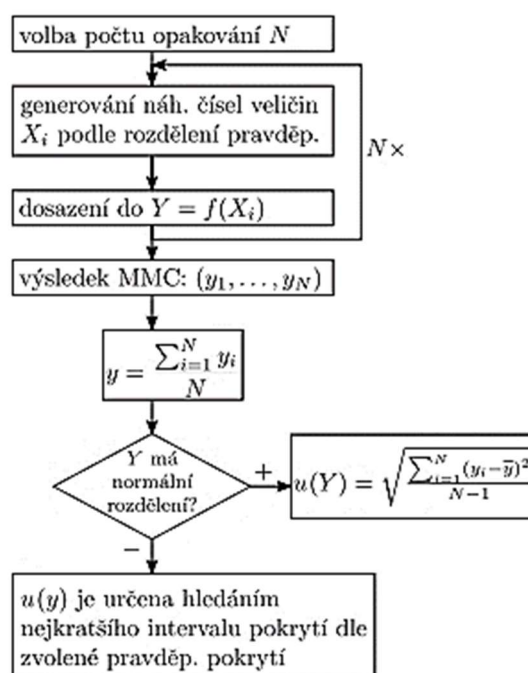
Při řešení úloh metodou Monte Carlo máme možnost výběru ze dvou přístupů:

- přístup založený na geometrické pravděpodobnosti,
- přístup založený na odhadu střední hodnoty náhodné veličiny. [14]

Algoritmus MMC, znázorněný na obrázku č. 14, může být popsán pomocí těchto bodů:

- Nejdříve se zvolí dostatečně velký počet opakování N .
- Pro každou vstupní veličinu X_i je vytvořeno pseudonáhodné číslo v závislosti na její hustotě pravděpodobnosti.
- Následně jsou pseudonáhodná čísla dosazena do modelu měření.
- Výsledkem MMC je N vypočtených hodnot výstupní veličiny Y tvořící pravděpodobnostní funkci výstupní veličiny.
- Pokud je rozdělení výstupní veličiny Y normální, nejistota $u(y)$ je vypočtena jako výběrová směrodatná odchylka. V jiných případech je nejistota určena hledáním nejkratšího intervalu pokrytí dle zvolené pravděpodobnosti pokrytí. [13,15]

Podrobnější postup bude popsán v samostatné kapitole.



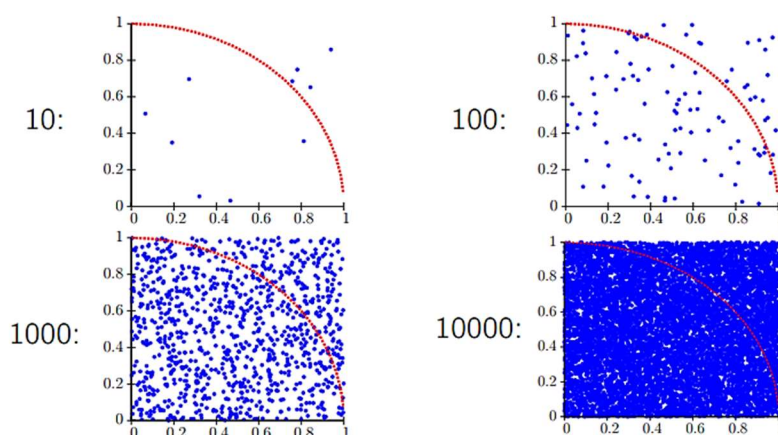
Obr. 14) Algoritmus výpočtu nejistot metodou Monte Carlo [13]

5.2 Příklad MMC - výpočet Ludolfova čísla

Velmi často je metoda Monte Carlo prezentována na příkladu výpočtu Ludolfova čísla π . Kdy pro názornou představu využijeme čtverec, do kterého je vepsána čtvrtkružnice.

Přičemž obsah čtvrtkružnice je $S_1 = \frac{\pi r^2}{4}$ a obsah čtverce $S_2 = r^2$.

Do čtverce potom náhodně umísťujeme body, které označíme N, jestliže leží ve čtverci a M v případě, že padly do výseče čtvrtkružnice. Ukázka pro různý počet bodů je znázorněna na obrázku č. 15. [15]



Obr. 15) Vypočet Ludolfova čísla MMC [15]

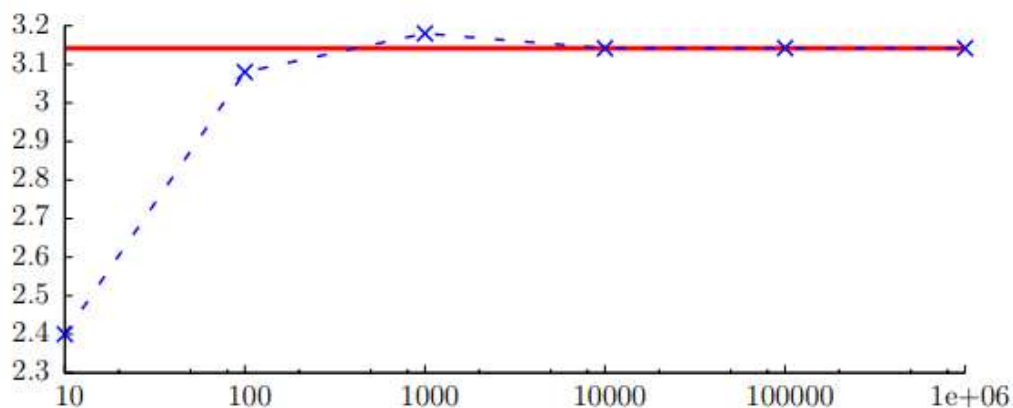
Pro výpočet platí vztah: [15]

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\pi r^2}{4r^2} \Rightarrow \pi = 4 \frac{S_1}{S_2}. \quad (20)$$

Převod vztahu na počty náhodných bodů: [14]

$$\pi = 4 \frac{M}{N}. \quad (21)$$

Při zvýšení řádu opakování (počtu náhodných bodů) se obvykle získá jedna cifra Ludolfova čísla navíc, jak je ukázáno na obrázku č.16.



Obr. 16) Závislost přesnosti na počtu opakování [15]

5.3 Výpočet nejistot měření pomocí metody MONTE CARLO

Algoritmus, jímž se řídí metoda Monte Carlo, může být vyjádřen následujícím postupem:

1. V prvním kroku je nutné vytvořit matematický model měření $Y=f(X)$, kde Y představuje skalární výstupní veličinu a X vyjadřuje M vstupních veličin. Každá veličina X_i se považuje za náhodnou veličinu s možnou hodnotou ξ_i , se střední hodnotou x_i a hustotou pravděpodobnosti $g(\xi_i)$. Y je také náhodná veličina se střední hodnotou y , možnou hodnotou η a hustotou pravděpodobnosti $g(\eta)$. Dále je zapotřebí zvolit počet opakování N metody Monte Carlo a také pravděpodobnost pokrytí p . [16]
2. Pro každou vstupní X_i veličinu se vygeneruje N náhodných vektorů x_i , $i=1, \dots, M$, a to v závislosti na hustotě rozdělení nejistot. To znamená, že je vytvořeno $N \cdot M$ čísel. [16]
3. Vygenerovaná čísla jsou posléze dosazena do vytvořeného modelu měření $y_i = f(x_i)$, $i=1, \dots, N$. V modelu měření i -tý prvek x_i nabývá hodnot $x_{1,i}, \dots, x_{M,i}$, kde $x_{j,i}$ je náhodné číslo závislé na hustotě rozdělení nejistot. [16]
4. Následně se provede seřazení hodnot y_i , $i=1, \dots, N$ do neklesajícího pořadí. Tento upravený model si označíme jako $y_{(i)}$, $i=1, \dots, N$. Ze souboru hodnot $y_{(i)}$ se poté určí diskrétní distribuční funkce G . [16]
5. Vypočítá se průměr \bar{y} :

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \quad (22)$$

a směrodatná odchylka:

$$u(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N - 1}}. \quad (23)$$

Respektive odhad y z Y a přidružená standardní nejistota $u(y)$.

6. V posledním kroku se pak určí interval pokrytí pro Y stanovený z diskrétní podoby G . Vypočítá se $q = pN$, přičemž $[y_{low}, y_{high}]$ můžeme označit jako $100p$ % interval pokrytí pro Y , kde $y_{low} = y_{(r)}$ a $y_{high} = y_{(i+q)}$ pro $r = 1, \dots, N - q$. Pravděpodobnostně symetrický $100p$ % interval pokrytí je vypočítán ze vztahu $i = \frac{(N-q)}{2}$. [16]

5.4 Generování náhodných čísel

Jelikož základním principem metody Monte Carlo je práce s náhodnými potažmo pseudonáhodnými čísly, je důležité představit, jakým způsobem mohou být tyto čísla získávána. Mezi nejčastější způsoby čerpání náhodných čísel se řadí:

- **Fyzikální generátory náhodných čísel** – jejich princip tkví v náhodných fyzikálních procesech. Příkladem takového fyzikálního procesu může být náhodný šum na polovodičovém přechodu nebo rozpad atomového jádra izotopu. Jsou označovány jako jedny z nejdokonalejších generátorů, neboť poskytují opravdu náhodná čísla. Jistou slabinou či omezením je jejich relativní pomalost. [17]

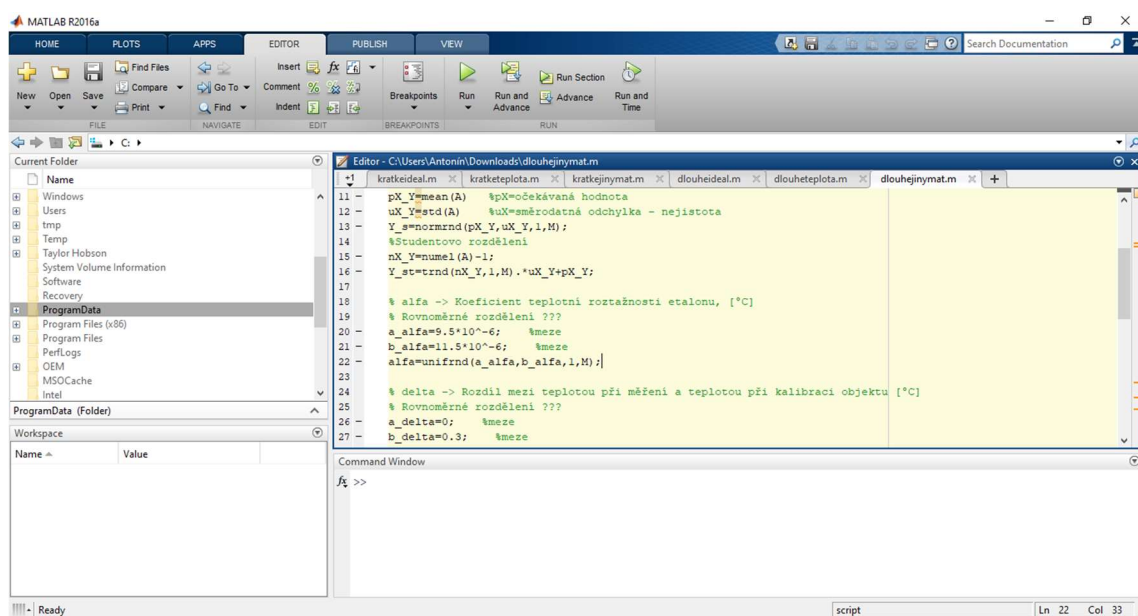
- **Tabulky náhodných čísel** – představují úložiště dat, která byla získána například právě pomocí fyzikálních procesů nebo tzv. elektronické rulety. Slouží jako pomůcka pro jednodušší manuální výpočty. Tabulky nebývaly příliš rozsáhlé (řádově desítky tisíc čísel), kdy nejrozsáhlejší z nich publikovala společnost RAND (milión číslic). Dříve byly přímo tištěny nebo ukládány na disky různých forem, avšak s nástupem moderní výpočetní techniky se jejich význam značně snížil. [17]

- **Vypočtená náhodná čísla** – tento způsob generování čísel je v současné době nejpoužívanější a je založen na aritmetických procedurách, kdy při použití speciálních rekurentních vzorců dostáváme tzv. pseudonáhodná čísla. Ty se liší od čísel náhodných tím, že byly získány přísně determinovaným způsobem (nejsou dokonale náhodná) a po uplynutí periody p se začínou opakovat. Proto klademe důraz na to, aby tato perioda byla co možná největší. Na rozdíl od dvou předešlých způsobů generují čísla rychle a v dostatečném počtu. [17]

5.5 Používaný software pro metodu MONTE CARLO

Jedním z omezení MMC je, že na její realizaci už nestačí pouze tužka a papír, ale musíme využít vhodného softwaru, který obsahuje kvalitní generátor čísel a umí zpracovat milióny hodnot. Na druhou stranu lze MMC použít i na řešení nejistot, které by byly jen s obtížemi řešitelné analyticky nebo pomocí metody GUF. Nemusíme pracovat s parciálními derivacemi a určovat stupně volnosti. I když se využije k určení nejistot měření metoda GUF, velmi často dochází ke kontrole vhodnosti aproximací, na nichž je GUF založena, pomocí MMC. V dnešní době už je mnohem snazší splnit požadavky na programové vybavení, to totiž mohlo v minulosti zapříčinit, že metrologové MMC nevyužívali. [13,15]

Základním programem, který je součástí většiny počítačů, je Microsoft Excel. Tento software sice obsahuje generátor pseudonáhodných čísel, avšak do verze 2007 s podstatnými chybami. I po odstranění velké části chyb generátoru ale nedosahuje stejných kvalit, jež vykazují specializované programy. Dalším problémem je také limit počtu řádků u starších verzí Excelu. Z těchto důvodů může být Excel doporučen pro vyzkoušení MMC, ale pro náročnější výpočty v praxi je vhodnější programem například Matlab. Mezi jeho přednosti jistě patří jednoduchá syntax, velký výpočetní výkon a komplexní grafické prostředí (viz obrázek č. 17), které z Matlabu činí téměř ideální nástroj. Jedna z jeho mála nevýhod je vysoká cena. Z tohoto důvodu může být pro mnoho lidí vhodnějším programem Octave, jehož použití, syntax a výpočetní výkon z velké části Matlab připomíná a je zdarma. Rozdílné je uživatelské prostředí, které je v Matlabu příjemnější. Existuje samozřejmě mnoho dalších programů placených i volně přístupných. Mezi placené se řadí program na zpracování dat Origin nebo WinBUGS. Software získatelný zdarma zastupuje statistický program R, OpenBUGS a další. [13]



Obr. 17) Prostředí programu Matlab

6 CHARAKTERISTIKA PŘÍSTROJE ZEISS/TESA A MOŽNOSTI JEHO MODERNIZACE

Jak již bylo zmíněno v úvodu, přístroj Zeiss/Tesa sloužící pro kalibraci koncových měrek od 125 do 1000 mm byl uveden do provozu na ČMI v Brně začátkem devadesátých let minulého století. I přes částečné úpravy nebylo možné bez radikální modernizace zabránit hardwarovému i softwarovému zastarání. Velmi důležitou část zařízení představuje tělo délkoměru značky Zeiss (obrázek č. 18), které je vyrobeno z litiny, jež postupem času „vystárlo“ a stala se rozměrově velmi stabilní. Na těle délkoměru je potom připevněn stolek na ustavování až 6 měrek. Snímání samotné délky zabezpečují indukčnostní snímače vyrobené firmou Tesa (obrázek č. 19). Tyto snímače délky se vyznačují velmi malou odolností vůči radiálnímu zatížení, z čehož vyplývá možnost vzniku chyb při vyvažování měrek. Dalším problémem je, že výstupní hodnoty ze snímačů je možné odečítat pouze ze zobrazovací jednotky Tesa S403 (obrázek č. 20) s ovládacími a zobrazovacími prvky, avšak bez možnosti připojení k počítači. To znamená povinnost pracovníka ručně zapisovat naměřené hodnoty, což je v dnešní době zbytečně zdlouhavé a přináší to možnost vnesení další chyby. Dále je přístroj Zeiss/Tesa osazen snímáním teploty, které je zajištěno dotykovými magnetickými čidly značky Amet (obrázek č. 21). Zde existuje možnost jejich propojení s počítačem přes rozhraní RS-232, avšak pouze se systémem Windows 98. Společným a zároveň velmi závažným problémem všech elektronických částí je nebezpečí poruchy, která by byla jen obtížně odstranitelná, jelikož není možnost, jak zajistit náhradní díly.



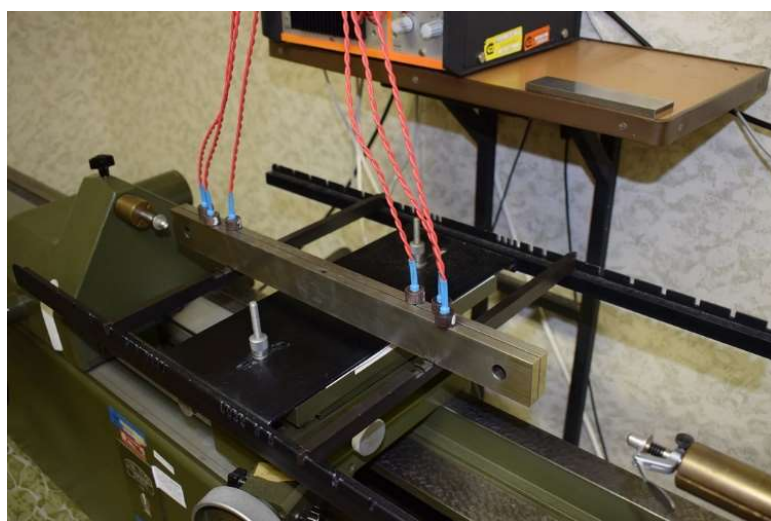
Obr. 18) Tělo délkoměru Zeiss



Obr. 19) Indukční snímač Tesa



Obr. 20) Zobrazovací jednotka Tesa S403



Obr. 21) Dotyková magnetická čidla značky Amet

6.1 Modernizace

Samotná modernizace přístroje Zeiss/Tesa byla ohraničena požadavky, které stanovil Český metrologický institut. Tyto požadavky se zejména týkají zachování určitých komponent zařízení. Mezi ně patří výše zmiňované tělo délkoměru Zeiss, které je schopno plnit svou funkci, i přes značné stáří, na nejvyšší úrovni. Druhou komponentou, která nevyžaduje bezpodmínečnou modernizaci, je ustavovací stolek umožňující uchycení 6 měrek. Klíčovými součástmi přístroje pro přizpůsobení požadavkům současné doby jsou pak zejména snímače délky, teploty a v neposlední řadě zjednodušení výstupu měřených dat.

V dnešní době je možnost výběru z produktů mnoha zavedených firem velmi široká. Jelikož Český metrologický institut je státním podnikem, bude nutné provést výběrové řízení, které určí finálního dodavatele.

6.2 Snímání délky

Snímání délky představuje v naší aplikaci nejdůležitější část modernizace. Pozornost byla věnována dvěma odlišným druhům měření, přičemž jedna možnost využívá indukčnostní snímače a druhá snímače inkrementální optické.

6.2.1 Indukčnostní snímače

Jednou z variant snímání délky je snímání pomocí indukčnostních snímačů délky. Jak už název napovídá, jejich princip tkví v převodu mechanické vstupní veličiny na změnu indukčnosti. Mezi hlavní části těchto pasivních snímačů patří cívka s jádrem, přičemž ono jádro může být feromagnetické nebo pouze elektricky vodivé. V okamžiku, kdy dojde k interakci snímače a vnější neelektrické veličiny, nastane změna polohy jádra vůči cívce, či cívkám, což zapříčiní změnu jejich charakteristik. Velmi často se využívá umístění dvou cívek do jednoho snímače. V tomto případě už nestačí brát do úvahy pouze vliv počtu závitů a velikosti cívky, elektrické a magnetické vlastnosti obvodu na indukčnost cívky, ale také vzájemnou indukčnost cívek, která se odvíjí od orientace a také jejich vzájemné vzdálenosti. [1,18]

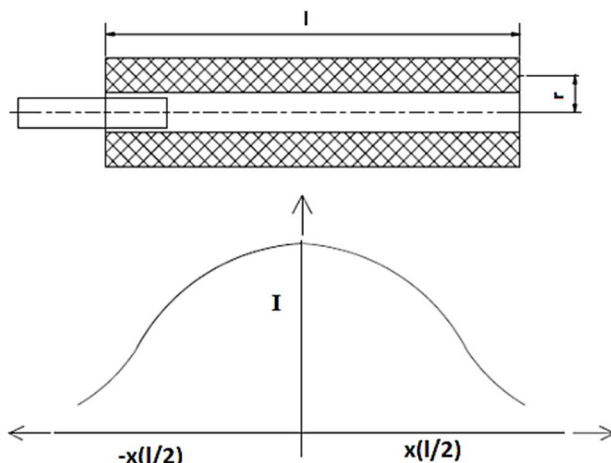
Podle toho, jakým způsobem docílíme změny indukčnosti, rozlišujeme čtyři druhy snímačů:

- indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým obvodem,
- indukčnostní snímač s malou vzduchovou mezerou,
- indukčnostní snímač s potlačeným pólem,
- indukčnostní snímač bez feromagnetika. [18]

V našem konkrétním případě se budu dále věnovat jen snímačům typu prvně jmenovaným, které jsou vhodné pro moji aplikaci.

Indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým obvodem

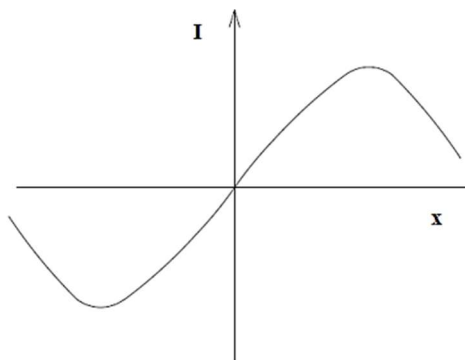
Konstrukce snímačů umožňují zasunutí feromagnetického jádra do cívky, čímž dojde ke změně její indukčnosti. Typickým znakem těchto snímačů je též rozdělení feromagnetického obalu cívky v podélném směru pro zamezení vzniku závitů nakrátko. Na obrázku č. 22 je znázorněna závislost intenzity magnetického pole na poloze jádra v ose cívky. [18]



Obr. 22) Indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým obvodem [18]

(I – el. Proud; l – délka cívky; r – poloměr cívky)

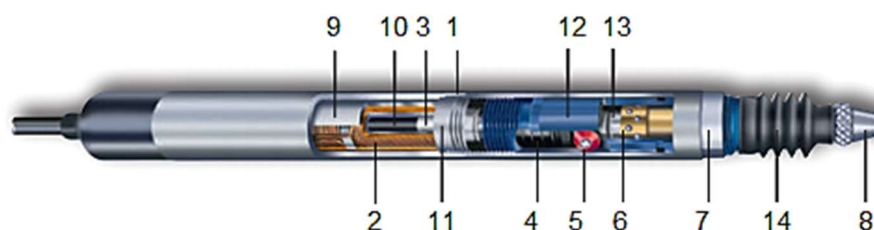
Velmi často dochází k zapojení snímače s otevřeným magnetickým polem diferenčním způsobem, což způsobí změnu průběhu hodnot intenzity magnetického pole, která je zobrazena na obrázku č. 23. Hlavním benefitem tohoto zapojení je především vzájemná kompenzace nelineárních indukčnostních změn, kterým bychom se jen obtížně vyvarovali. Mezi hlavní výhody těchto snímačů patří jejich jednoduchost, mechanická odolnost, příznivá cena, dostatečná spolehlivost a v neposlední řadě metrologické vlastnosti. [18]



Obr. 23) Průběh intenzity magnetického pole při diferenčním zapojení indukčnostního snímače [18]

Přítlačná síla indukčnostních snímačů je vyvinuta buď pružinou, nebo je zajištěna stlačeným vzduchem.

Jedním ze základních a v praxi průmyslem pravděpodobně nejvyužívanějším typem indukčnostního snímače se stal tzv. tužkový snímač. Pojmenování získal díky svému podlouhlému tvaru. Jeho řez, který odkrývá funkční prvky, je proveden na obrázku č. 24. V zadní části snímače jsou řezem zobrazeny dvě cívky, v nichž se pohybuje jádro z feromagnetického materiálu. Cívky jsou umístěny ve stínícím plášti zajišťujícím odstínění okolních vlivů. Pohyb a vedení jádra umožňující přenos vstupního signálu je zajištěn pomocí kuličkového vedení, které dobře odolává radiálnímu zatížení. Důležitou roli hraje vodící systém zabraňující možné rotaci vnitřních prvků snímače a pružina, kterou je osazen samotný měřící trn zajišťující přítlačení snímacího doteku. Přítlačná síla indukčnostních snímačů je vyvinuta buď právě pružinou nebo je zajištěna stlačeným vzduchem. Část měřícího trnu, která vystupuje vně ochranného pláště snímače, je chráněná gumovým ochranným krytem. [19]






Obr. 24) Tužkový indukčnostní snímač [20]

- 1 – plášť senzoru, 2 – cívky, 3 – upevňovací člen jádra (korekce rozdílné tepelné roztažnosti), 4 – přítlačná pružina, 5 – vodící systém, 6 – kuličkové vedení, 7 – vymezovací kroužek, 8 – snímací dotek, 9 – stínící plášť, 10 – feromagnetické jádro, 11 – zajišťovací matka, 12 – uložení vedení, 13 – měřící trn, 14 – ochranný prvek trnu

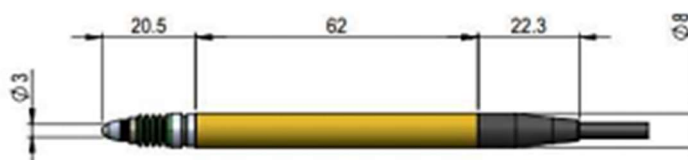
Rozlišujícím prvkem mezi jednotlivými snímači je vyhotovení měřícího doteku. Nejčastěji využívanou variantu představuje kulička, která může být vyrobena ze široké škály materiálů (rubín, ocel, slinuté karbidy aj.). Další typ doteku představuje dotek diskový, hrotový, ale mohou být i další. Z důvodu minimalizování vlivu obsluhy a následného vnesení chyby do měření může být snímač vybaven automatickým odstavením snímacího doteku. Toto odstavení je zajištěno pomocí vakuového nebo pneumatického systému. Čas, za který bude možné odečíst naměřené hodnoty po kontaktu s měřeným objektem, je určen také dobou dokmitu snímače, jež je definována zejména přítlačnou pružinou (je-li přítlačná síla zajištěna pružinou). [19]

Mezi důležité parametry, které hrají rozhodující roli při výběru senzoru, patří: měřicí zdvih, rozlišitelnost, linearita, opakovatelnost a další. Tabulka č. 5 obsahuje přehled vlastností snímačů tří různých značek a jejich vlastností.

Tab 5) Srovnání snímačů PETER HIRT, Tesa, Mahr [10,20,21]

Výrobce/model	 PETER HIRT T101F	 Tesa -GT21	 Mahr Millimar P2004
Celkový zdvih	4,6 mm	4,3 mm	4,4 mm
Měřicí zdvih	± 1 mm	± 1 mm	± 2 mm
Opakovatelnost	0,01 μ m	0,01 μ m	0,01 μ m
Linearita	0,25% na ± 1 mm	0,10% na ± 1 mm	0,15% na ± 1 mm
Měřicí síla	0,63 N	0,63 N	0,75 N
Stupeň krytí	IP64	IP64	IP64
Vývod kabelu	axiální	axiální	axiální
Kompatibilita	Tesa	Tesa	Mahr- VLDT, Tesa, Marposs, Federal

Optimální variantu představuje snímač švýcarského výrobce PETER HIRT T101F, jehož vlastnosti perfektně odpovídají účelu jeho využití, viz například měřicí zdvih ± 1 mm nebo upevňovací průměr 8h6. Rozměry senzoru jsou znázorněny na obrázku č. 25. Další klad dozajisté představuje skutečnost, že zastoupení firmy PETER HIRT zprostředkovává v České republice firma Mesing, s kterou má ČMI velmi pozitivní zkušenosti z předchozích spoluprací na jiných aplikacích, a také to, že firma sídlí v Brně, což při detekování jakéhokoli problému urychlí jeho vyřešení. [10]

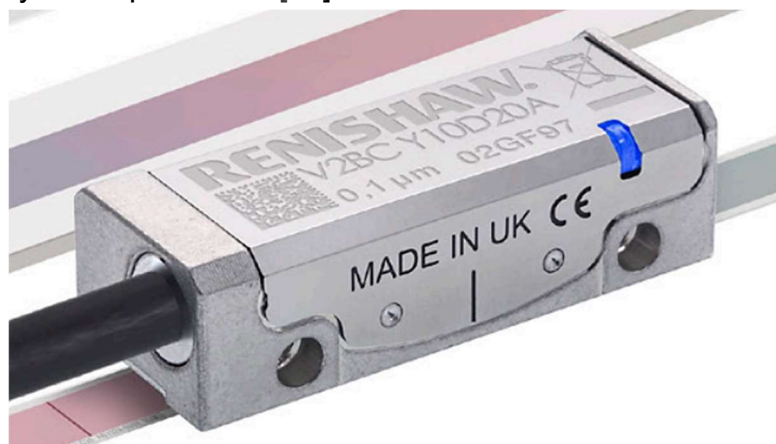


Obr. 25) PETER HIRT T101F [10]

6.2.2 Optický snímač

Druhou a zcela odlišnou variantu snímání délky představuje použití inkrementálního optického snímače. Pro naši aplikaci by byl využit typ inkrementálního snímače, který vyhodnocení délky provádí díky pohyblivému pravítku, jenž je tvořeno buď střídáním průsvitné a neprůsvitné plochy nebo odrazné a neodrazné. Vyhodnocení signálu zprostředkovává fototranzistor, na který dopadají paprsky odrazem nebo průchodem zmiňovaným pravítkem. Posun pravítka následně zapříčiní změnu kolektorového napětí.

Navrhovaným řešením je použití optického snímače řady VIONIC (obrázek č. 26) vyráběného firmou Renishaw. Tato optoelektronická součástka kompaktních rozměrů umožňuje snímání délky s rozlišením 2,5 nm. Pro správnou funkci snímače musí dojít k jeho umístění do přesné vzdálenosti od stupnice, kterou je možno vyrobit z různých materiálů. V našem případě bylo vybráno ocelové lineární pravítko nesoucí označení RSLM20 (obrázek č. 27). Nerezový profil, na němž se střídají odrazové a neodrazové plochy, které byly vytvořeny laserem ve vzdálenosti 20 μm , se vyznačuje vysokou přesností. [22]



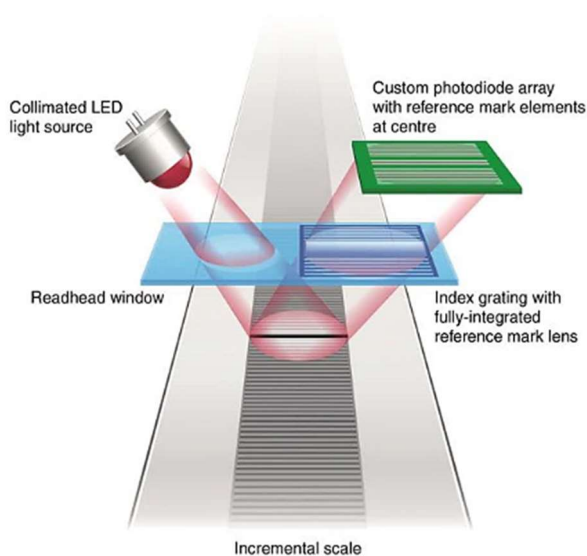
Obr. 26) Snímač VIONIC [22]



Obr. 27) Ocelové pravítko RSLM20 [22]

Snímače VIONiC jsou opatřeny filtrační optikou, která je zobrazena na obrázku č. 28, díky které dojde k odfiltrování nepravidelných prvků, jako jsou například nečistoty. Aby došlo ke vzniku čistého pole interferenčních proužků, je nutné také filtrovat odraz od stupnice s nominálně obdélníkovým průběhem vln. [22]

Zajištění přenosu pohybu dotyku na pohyb pravítka vůči snímači bude uskutečněno pomocí upraveného indukčnostního snímače s kuličkovým vedením, ze kterého byly vyjmuty cívky. Takto upravený snímač je v současné době podroben testům a úpravám v Českém metrologickém institutu, na které dohlíží pan docent Jankových. [19]



Obr. 28) Filtrační optika snímače VIONiC [22]

Velmi žádaným doplňkem je interfaceu ADT (Obr. č. 29), po jehož připojení k počítači přes rozhraní USB získáme možnost využití softwaru ADT View, který představuje moderní diagnostický nástroj poskytující nám komplexní zpětnou vazbu v reálném čase. Přináší celou řadu možností, jako je optimalizace signálu v celé délce osy, indikace klopení čtecí hlavy a další. Tato varianta bude vhodná pro budoucí použití, avšak v současné době při testech nesplňovala požadavky na opakovatelnost měření. [22]



Obr. 29) Rozhraní ADT [22]

6.3 Snímání teploty

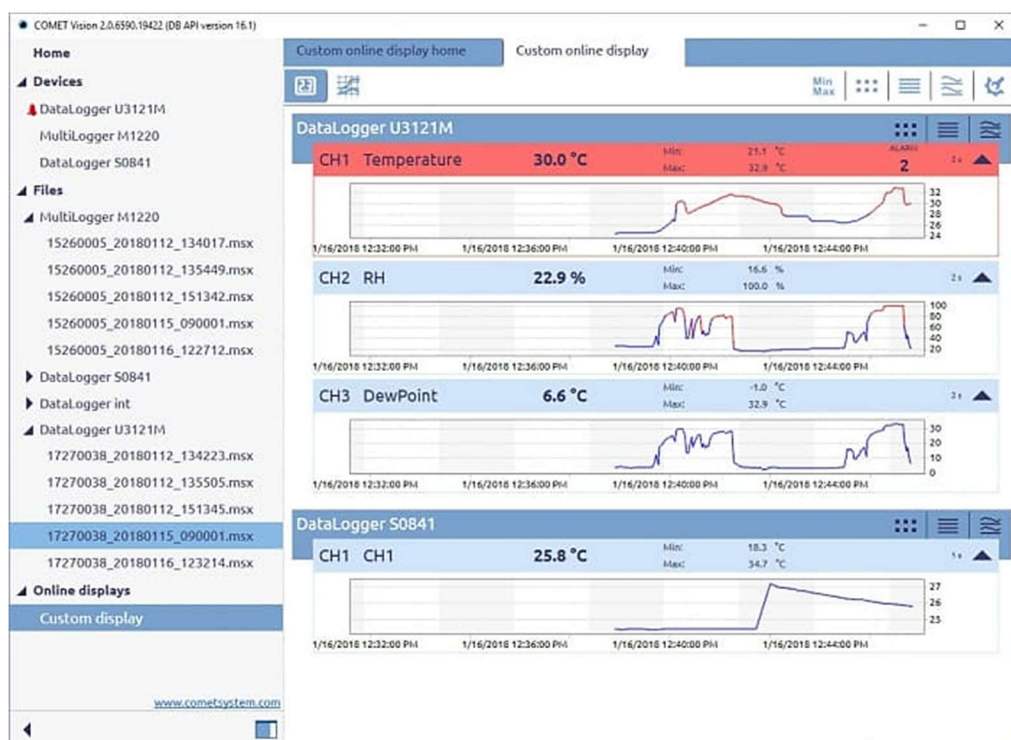
Pro snímání teploty byl zvolen čtyřkanálový záznamník U7844 značky Comet zobrazený na obrázku č. 30. Tento datalogger bude zaznamenávat informace ze čtyř binárních vstupů. Kromě teplot pracuje i s údaji o vlhkosti vzduchu. Předmětné vstupy reprezentuje čtveřice sond pro měření povrchové teploty s magnetem Pt1000TR158/E-2m znázorněné na obrázku č. 31 (taktéž od firmy Comet). Jejich funkce je založena na odporovém snímání teploty a jsou určeny pro měření povrchové teploty feromagnetických těles. Teplotní rozsah je pro náš konkrétní účel použití více než dostatečný a odpovídá rozmezí -30 až 150 °C. Minimální plocha pro umístění na měřený povrch musí mít průměr 28 mm. Jelikož přenos probíhá pomocí kabelu, snímače teploty zajišťují rychlou odezvu na změnu teploty, kterou můžeme ještě urychlit, a to v případě, že použijeme silikonovou vazelínu nebo teplotně vodivé pasty mezi měřenou plochou a snímačem. Celkový záznam je následně ukládán do energeticky nezávislé elektronické paměti. Údaje lze kdykoli přenést a následně zpracovávat v osobním počítači přes rozhraní USB-C v programu Comet Vision, jehož prostředí zobrazuje obrázek č. 32. V situaci, že dojde k překročení nastavených mezí, jsou alarmy indikovány na přístroji pomocí LED, LCD a akusticky. [23]



Obr. 30) Záznamník Comet U7844 [23]



Obr. 31) Teplotní sonda Comet Pt1000TR158 [23]



Obr. 32) Prostředí programu Comet Vision 2 [23]

Konečné zpracování naměřených dat na pracovišti bude zabezpečeno vyhodnocovací jednotkou Imeco TB2 (Obr. č. 33) umožňující připojení přes rozhraní USB k počítači. Jedná se o 2-kanálovou jednotku bez ovládacích a zobrazovacích prvků vybavenou i funkcemi pro rozsáhlé dynamické měřicí úlohy. Na počítači bude instalován software Měcky. Tento software umožňuje měření sad koncových měrek podle etalonové sady a markantně přispívá ke zjednodušení práce obsluhy přístroje. Program automaticky započítává odchylky etalonů a vypočte nejistoty měření. Software umožňuje velkou míru přizpůsobení individuálním potřebám uživatele, například v možnosti volby metody měření ve středním bodě měrky nebo klasickou pětibodovou metodou. Intuitivní a přehledné prostředí programu je znázorněno na obrázku č. 34.



Obr. 33) Vyhodnocovací jednotka Imeco TB2

Doměřená a uzavřená sada: 93808 (C:\Merky5\Sady\Demo2.SAD)

Údaje o měřené sadě | Seznam měrek | Měření sady | Nejistoty měření | Výsledky měření sady | Kalibrační list

Měřená sada
93808
Počet měrek v sadě: 87
Zadáno měrek: 87
Již změřeno měrek: 87

100%

Smazat měrku Měrka chybí

	Jm.dl.	Odchylka	Povrch	OK?
4	1,0020	+0,20	a	Ano
5	1,0030	-0,02	a	Ano
6	1,0040	+0,11	a	Ano
7	1,0050	-0,04	a	Ano
8	1,0060	-0,03	a	Ano
9	1,0070	+0,16	a	Ano
10	1,0080	-0,02	a	Ano
11	1,0090	+0,05	a	Ano
12	1,0100	-0,06	a	Ano
13	1,0200	+0,02	b	Ano

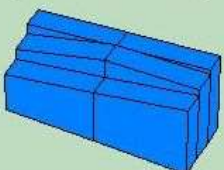
Měřená měrka
Jmenovitá délka: 1,0080 mm
Hodnocení povrchu: a = 100 %
Označení měrky:
Teplota měrky: 0,00 [°C]

Etalonová měrka
Jmenovitá délka: 1 mm
Odchylka etalonu: 0,11 μm
Skutečný rozměr: 1,00011 mm

Start měření

[μm]	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Bod 4	Bod 5	Bod 6	Bod 2	Bod 1
č.1		-0,01	-0,12	-0,05	0,00	-0,03		0,11
č.2		-0,05	-0,12	-0,06	-0,01	-0,03		0,09
č.3		-0,01	-0,12	-0,05	0,01	-0,02		0,12
č.4								
č.5								
Ua		0,0307	0,0000	0,0077	0,0133	0,0077		0,0203
Průměr		-0,02	-0,12	-0,05	0,00	-0,03		0,11

Výsledky měření koncové měrky



Úchylka středové délky:	-0,02 μm	Největší délka lmax:	1,00800 mm
Rozpětí délky:	0,12 μm	Nejmenší délka lmin:	1,00788 mm
Střední chyba měrky:	-0,04 μm	Největší kladná úchylka fo:	0,02 μm
Celková chyba měrky:	0,12 μm	Nejmenší záporná úchylka fu:	0,10 μm
Nejistota měření typu Ua:	0,0307 μm	Odpovídá třídě přesnosti:	1
Standardní nejistota Ub:	-	Kom. st. nejistota Uc:	-

Hodnocení měrky: **Odpovídá třídě přesnosti sady.**

Obr. 34) Prostředí programu Měrky [10]

7 ODHAD NEJISTOTY MĚŘENÍ PRO NAVRHOVANÉ ŘEŠENÍ MODERNIZACE

Stanovení nejistoty měřením výpočtem vychází ze vztahu pro výstupní veličiny, který byl sestaven na základě znalosti měřicí úlohy a má tvar:

$$L_x = L_s + \delta L + \delta L_C - l_n \cdot (\alpha \cdot \delta t + \delta \alpha \cdot \Delta t), \quad (24)$$

kde:

- L_x délka kalibrované měrky při referenční teplotě 20 °C,
- L_s délka etalonové měrky při referenční teplotě 20 °C,
- δL zjištěný rozdíl délky mezi kalibrovanou a etalonovou měrkou,
- δL_C korekce snímače,
- l_n jmenovitá délka,
- α koeficient teplotní roztažnosti materiálu (průměr etalonové a kalibrované měrky),
- δt teplotní rozdíl mezi etalonovou a kalibrovanou měrkou,
- $\delta \alpha$ rozdíl koeficientů teplotní roztažnosti materiálu etalonové a kalibrované měrky,
- Δt odchylka teploty od 20 °C (průměr etalonové a kalibrované měrky). [6]

Samotný vztah pro stanovení nejistoty u standardního měření je roven:

$$u^2 = u_{LS}^2 + u_{\delta L}^2 + u_{\delta L_C}^2 + (l_n \cdot \alpha \cdot u_{\delta t})^2 + (l_n \cdot u_{\Delta t} \cdot u_{\delta \alpha})^2, \quad (25)$$

kde:

- u standardní nejistota výstupní veličiny,
- u_{LS} standardní nejistota etalonové měrky,
- $u_{\delta L}$ standardní nejistota (typu A) zjištěného rozdílu délek,
- $u_{\delta L_C}$ standardní nejistota od snímače,
- $u_{\delta t}$ standardní nejistota teplotního rozdílu mezi etalonovou a kalibrovanou měrkou,
- $u_{\Delta t}$ standardní nejistota odchylka teploty od 20 °C,
- $u_{\delta \alpha}$ standardní nejistota rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti materiálu etalonové a kalibrované měrky. [6]

Pro zvýšení pravděpodobnosti správného stanovení nejistoty využijeme koeficient rozšíření, který byl zvolen velikosti 2.

Výpočty jsou provedeny pro řešení využívající indukčnostní snímač PETER HIRT T101F a zahrnují několik variant tak, aby pokrývaly situace, jež mohou při kalibraci nastat. To znamená, že postihnou rozpětí délek od 125 do 1000 mm, odlišnost materiálu etalonové a kalibrované měrky a v neposlední řadě různé odchylky teplot. Ideální teplotní podmínky představují nulovou odchylku od 20 °C i nulový rozdíl teplot mezi etalonovou a kalibrovanou měrkou.

Odhad nejistoty měření pro měrky délky 125 mm

- **Měrky stejného materiálu (ideální teplotní podmínky)**

u_{LS} standardní nejistota etalonové měrky
údaj z kalibračního listu → etalon 2. řádu $U_E = (0,05 + 0,5 \cdot L)$,

$$u_{LS} = \frac{U_E}{2} = \frac{(0,05 + 0,5 \cdot 0,125)}{2} \doteq 0,056 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta L}$ standardní nejistota (typu A) zjištěného rozdílu délek
jelikož se jedná o návrh, nejsme schopni provést reálné měření a následně vypočítat nejistoty typu A podle rozptýlení hodnot. Proto byla tato nejistota odhadnuta jako velikost udávané opakovatelnosti indukčnostního snímače. Tato hodnota se bude opakovat ve všech variantách výpočtu,

$$u_{\delta L} = 0,01 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta LC}$ standardní nejistota od snímače
hodnota získaná od výrobce (nelinearita, která by mohla způsobit další podíl nejistoty se výrazně sníží, z důvodu použití dvou snímačů v ose proti sobě a možnosti její korekce),

$$u_{\delta LC} = 0,01 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta t}$ standardní nejistota teplotního rozdílu mezi etalonovou a kalibrovanou měrkou
v ideálním případě bereme tuto nejistotu jako nulovou,

$$u_{\delta t} = 0 \text{ °C}.$$

$u_{\Delta t}$ standardní nejistota odchylky teploty od 20 °C
v ideálním případě bereme tuto nejistotu jako nulovou,

$$u_{\Delta t} = 0 \text{ °C}.$$

$u_{\delta\alpha}$ standardní nejistota rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti materiálu etalonové a kalibrované měřky
při použití měrek stejného materiálu by rozdíl koeficientů teplotní roztažnosti materiálu neměl přesáhnout $0,1 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1} = 0,1 \mu m/m \text{ } ^\circ C$.
(Střední hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti oceli bereme $11,5 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1} = 11,5 \mu m/m \text{ } ^\circ C$), [1]

$$u_{\delta\alpha} = \frac{\delta\alpha}{\sqrt{3}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} \doteq 0,058 \mu m/m \text{ } ^\circ C.$$

Po dosazení jednotlivých složek do rovnice standardní nejistoty měření získáme výsledek:

$$u = \sqrt{u_{LS}^2 + u_{\delta L}^2 + u_{\delta LC}^2 + (l_n \cdot \alpha \cdot u_{\delta t})^2 + (l_n \cdot u_{\Delta t} \cdot u_{\delta\alpha})^2}$$

$$u \doteq \sqrt{0,056^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + (0,125 \cdot 11,5 \cdot 0)^2 + (0,125 \cdot 0 \cdot 0,058)^2}$$

$$u \doteq 0,058 \mu m.$$

Rozšířená nejistota:

$$U = 2 \cdot u = 2 \cdot 0,058 \doteq 0,12 \mu m.$$

- **Měřky stejného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)**

u_{LS} standardní nejistota etalonové měřky
údaj z kalibračního listu \rightarrow etalon 2. řádu $U=(0,05+0,5 \cdot L)$,

$$u_{LS} = \frac{U_E}{2} = \frac{(0,05 + 0,5 \cdot 0,125)}{2} \doteq 0,056 \mu m.$$

$u_{\delta L}$ standardní nejistota (typu A) zjištěného rozdílu délek
viz první varianta,

$$u_{\delta L} = 0,01 \mu m.$$

$u_{\delta LC}$ standardní nejistota od snímače
hodnota získaná od výrobce,

$$u_{\delta LC} = 0,01 \mu m.$$

$u_{\delta t}$ standardní nejistota teplotního rozdílu mezi etalonovou a kalibrovanou měrkou

jelikož měřky zůstávají v laboratoři relativně dlouhou dobu, aby došlo ke sjednocení teploty, neměl by jejich rozdíl přesáhnout $\pm 0,3$ °C. Při tomto rozdílu teplot bychom se ovšem už dopouštěli hrubé chyby při měření,

$$u_{\delta t} = \frac{\delta t}{\sqrt{3}} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,173 \text{ °C.}$$

$u_{\Delta t}$ standardní nejistota odchylky teploty od 20 °C
v praxi se tato odchylka pohybuje do hodnot $\pm 0,3$ °C. Jelikož je měření prováděno v laboratoři, která disponuje klimatizačním systémem, je maximální hodnota tohoto rozdílu velmi nepravděpodobná,

$$u_{\Delta t} = \frac{\Delta t}{\sqrt{3}} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,173 \text{ °C.}$$

$u_{\delta \alpha}$ standardní nejistota rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti materiálu etalonové a kalibrované měřky

při použití měrek stejného materiálu by rozdíl koeficientů teplotní roztažnosti materiálu neměl přesáhnout $0,1 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} = 0,1 \text{ } \mu\text{m/m } ^\circ\text{C}$.

(Střední hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti oceli bereme $11,5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} = 11,5 \text{ } \mu\text{m/m } ^\circ\text{C}$), [1]

$$u_{\delta \alpha} = \frac{\delta \alpha}{\sqrt{3}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} \doteq \frac{0,058 \mu\text{m}}{\text{m}} \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Po dosazení jednotlivých složek do rovnice standardní nejistoty měření získáme výsledek:

$$u = \sqrt{u_{LS}^2 + u_{\delta L}^2 + u_{\delta LC}^2 + (l_n \cdot \alpha \cdot u_{\delta t})^2 + (l_n \cdot u_{\Delta t} \cdot u_{\delta \alpha})^2}$$

$$u = \sqrt{0,056^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + (0,125 \cdot 11,5 \cdot 0,173)^2 + (0,125 \cdot 0,173 \cdot 0,058)^2}$$

$$u \doteq 0,255 \text{ } \mu\text{m.}$$

Rozšířená nejistota:

$$U = 2 \cdot u = 2 \cdot 0,255 \doteq 0,51 \text{ } \mu\text{m.}$$

- **Měrky odlišného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)**

u_{LS} standardní nejistota etalonové měrky
údaj z kalibračního listu → etalon 2. řádu $U=(0,05+0,5 \cdot L)$,

$$u_{LS} = \frac{U_E}{2} = \frac{(0,05 + 0,5 \cdot 0,125)}{2} \doteq 0,056 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta L}$ standardní nejistota (typu A) zjištěného rozdílu délek

$$u_{\delta L} = 0,01 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta LC}$ standardní nejistota od snímače
hodnota získaná od výrobce,

$$u_{\delta LC} = 0,01 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta t}$ standardní nejistota teplotního rozdílu mezi etalonovou a kalibrovanou měrkou
jelikož měrky zůstávají v laboratoři relativně dlouhou dobu, aby došlo ke sjednocení teploty, neměl by jejich rozdíl přesáhnout $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Při tomto rozdílu teplot bychom se ovšem už dopouštěli hrubé chyby při měření,

$$u_{\delta t} = \frac{\delta t}{\sqrt{3}} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,173 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$u_{\Delta t}$ standardní nejistota odchylky teploty od $20 \text{ }^\circ\text{C}$
v praxi se tato odchylka pohybuje do hodnot $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Jelikož je měření prováděno v laboratoři, která disponuje klimatizačním systémem, je maximální hodnota tohoto rozdílu velmi nepravděpodobná,

$$u_{\Delta t} = \frac{\Delta t}{\sqrt{3}} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,173 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$u_{\delta\alpha}$ standardní nejistota rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti materiálu etalonové a kalibrované měrky
při použití měrek odlišného materiálu (ocel-keramika) je rozdíl koeficientů teplotní roztažnosti materiálu přibližně $2 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} = 2 \text{ } \mu\text{m/m } ^\circ\text{C}$.
(Střední hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti oceli bereme $11,5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} = 11,5 \text{ } \mu\text{m/m } ^\circ\text{C}$, keramiky $9,5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} = 9,5 \text{ } \mu\text{m/m } ^\circ\text{C}$.), [1]

$$u_{\delta\alpha} = \frac{\delta\alpha}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \doteq 1,155 \text{ } \mu\text{m/m } ^\circ\text{C}.$$

Po dosazení jednotlivých složek do rovnice standardní nejistoty měření získáme výsledek:

$$u = \sqrt{u_{LS}^2 + u_{\delta L}^2 + u_{\delta LC}^2 + (l_n \cdot \alpha \cdot u_{\delta t})^2 + (l_n \cdot u_{\Delta t} \cdot u_{\delta\alpha})^2}$$

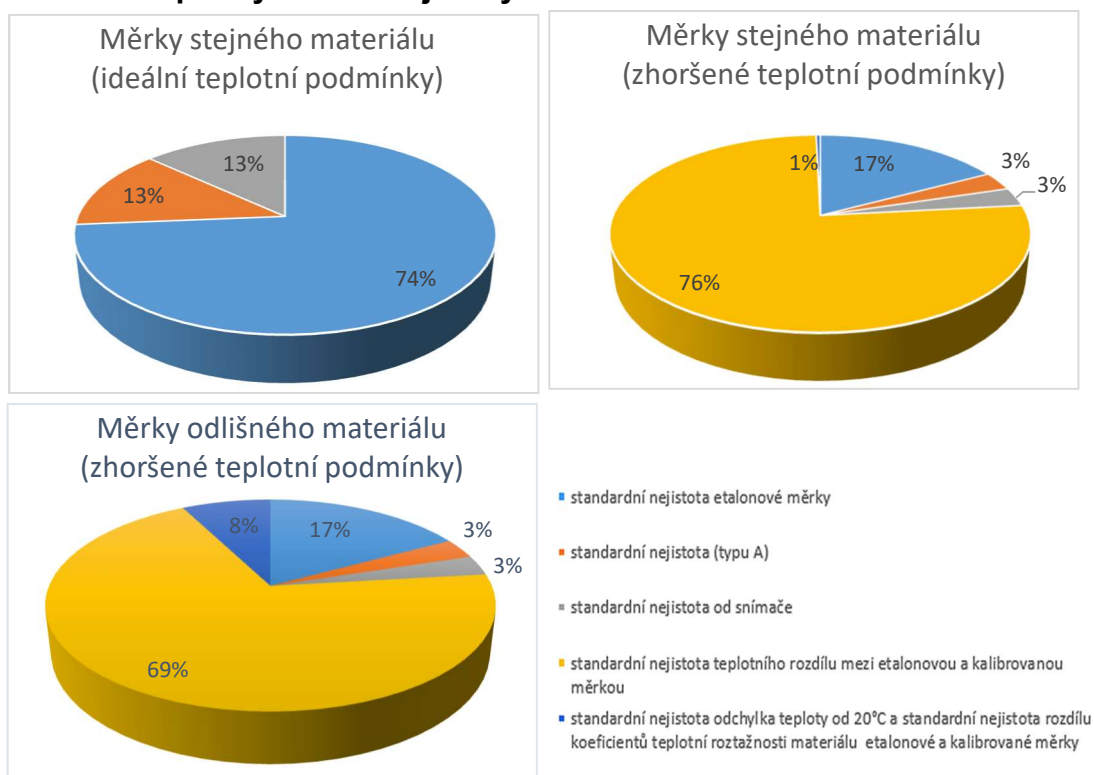
$$u = \sqrt{0,056^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + (0,125 \cdot 10,5 \cdot 0,173)^2 + (0,125 \cdot 0,173 \cdot 1,155)^2}$$

$$u \doteq 0,236 \text{ } \mu\text{m}.$$

Rozšířená nejistota:

$$U = 2 \cdot u = 2 \cdot 0,236 \doteq 0,47 \text{ } \mu\text{m}.$$

Jednotlivé podíly složek nejistoty u měrek 125 mm



Obr. 35) Podíl jednotlivých složek na výslednou nejistotu u měrek 125 mm

Odhad nejistoty měření pro měřky délky 1000 mm

- Měřky stejného materiálu (ideální teplotní podmínky)**

u_{LS} standardní nejistota etalonové měřky
údaj z kalibračního listu → etalon 2. řádu $U=(0,05+0,5 \cdot L)$,

$$u_{LS} = \frac{U_E}{2} = \frac{(0,05 + 0,5 \cdot 1)}{2} = 0,275 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta L}$ standardní nejistota (typu A) zjištěného rozdílu délek

$$u_{\delta L} = 0,01 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta LC}$ standardní nejistota od snímače
hodnota získaná od výrobce,

$$u_{\delta LC} = 0,01 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta t}$ standardní nejistota teplotního rozdílu mezi etalonovou a kalibrovanou měrkou
v ideálním případě bereme tuto nejistotu jako nulovou,

$$u_{\delta t} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$u_{\Delta t}$ standardní nejistota odchylky teploty od 20 °C
v ideálním případě bereme tuto nejistotu jako nulovou,

$$u_{\Delta t} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$u_{\delta \alpha}$ standardní nejistota rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti materiálu etalonové a kalibrované měřky
při použití měrek stejného materiálu by rozdíl koeficientů teplotní roztažnosti materiálu neměl přesáhnout $0,1 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} = 0,1 \mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$.
(Střední hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti oceli bereme $11,5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} = 11,5 \mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$), [1]

$$u_{\delta \alpha} = \frac{\delta \alpha}{\sqrt{3}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} \doteq 0,058 \mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}.$$

Po dosazení jednotlivých složek do rovnice standardní nejistoty měření získáme výsledek:

$$u = \sqrt{u_{LS}^2 + u_{\delta L}^2 + u_{\delta LC}^2 + (l_n \cdot \alpha \cdot u_{\delta t})^2 + (L \cdot u_{\Delta t} \cdot u_{\delta \alpha})^2}$$

$$u \doteq \sqrt{0,275^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + (0,125 \cdot 11,5 \cdot 0)^2 + (0,125 \cdot 0 \cdot 0,058)^2}$$

$$u \doteq 0,275 \mu\text{m}.$$

Rozšířená nejistota:

$$U = 2 \cdot u = 2 \cdot 0,275 = 0,55 \mu\text{m}.$$

- **Měrky stejného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)**

u_{LS} standardní nejistota etalonové měrky
údaj z kalibračního listu → etalon 2. řádu $U=(0,05+0,5 \cdot L)$,

$$u_{LS} = \frac{U_E}{2} = \frac{(0,05 + 0,5 \cdot 1)}{2} = 0,275 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta L}$ standardní nejistota (typu A) zjištěného rozdílu délek

$$u_{\delta L} = 0,01 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta LC}$ standardní nejistota od snímače
hodnota získaná od výrobce snímače,

$$u_{\delta LC} = 0,01 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta t}$ standardní nejistota teplotního rozdílu mezi etalonovou a kalibrovanou měrkou
jelikož měrky zůstávají v laboratoři relativně dlouhou dobu, aby došlo ke sjednocení teploty, neměl by jejich rozdíl přesáhnout $\pm 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$. Při tomto rozdílu teplot bychom se ovšem už dopouštěli hrubé chyby při měření,

$$u_{\delta t} = \frac{\delta t}{\sqrt{3}} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,173 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$u_{\Delta t}$ standardní nejistota odchylky teploty od 20 °C
v praxi se tato odchylka pohybuje do hodnot $\pm 0,3$ °C. Jelikož je měření prováděno v laboratoři, která disponuje klimatizačním systémem, je maximální hodnota tohoto rozdílu velmi nepravděpodobná,

$$u_{\Delta t} = \frac{\Delta t}{\sqrt{3}} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,173 \text{ °C.}$$

$u_{\delta\alpha}$ standardní nejistota rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti materiálu etalonové a kalibrované měřky
při použití měrek stejného materiálu by rozdíl koeficientů teplotní roztažnosti materiálu neměl přesáhnout $0,1 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} = 0,1 \text{ } \mu\text{m/m } ^\circ\text{C}$.
(Střední hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti oceli bereme $11,5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} = 11,5 \text{ } \mu\text{m/m } ^\circ\text{C}$), [1]

$$u_{\delta\alpha} = \frac{\delta\alpha}{\sqrt{3}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} \doteq 0,058 \text{ } \mu\text{m/m } ^\circ\text{C.}$$

Po dosazení jednotlivých složek do rovnice standardní nejistoty měření získáme výsledek:

$$u = \sqrt{u_{LS}^2 + u_{\delta L}^2 + u_{\delta LC}^2 + (l_n \cdot \alpha \cdot u_{\delta t})^2 + (L \cdot u_{\Delta t} \cdot u_{\delta\alpha})^2}$$

$$u = \sqrt{0,275^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + (1 \cdot 11,5 \cdot 0,173)^2 + (1 \cdot 0,173 \cdot 0,058)^2}$$

$$u \doteq 2,008 \text{ } \mu\text{m.}$$

Rozšířená nejistota:

$$U = 2 \cdot u = 2 \cdot 2,008 \doteq 4,02 \text{ } \mu\text{m.}$$

- **Měrky odlišného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)**

u_{LS} standardní nejistota etalonové měřky
údaj z kalibračního listu \rightarrow etalon 2. řádu $U=(0,05+0,5 \cdot L)$,

$$u_{LS} = \frac{U_E}{2} = \frac{(0,05 + 0,5 \cdot 1)}{2} = 0,275 \text{ } \mu\text{m}$$

$u_{\delta L}$ standardní nejistota (typu A) zjištěného rozdílu délek

$$u_{\delta L} = 0,01 \text{ } \mu\text{m.}$$

$u_{\delta LC}$ standardní nejistota od snímače
hodnota získaná od výrobce,

$$u_{\delta LC} = 0,01 \mu\text{m}.$$

$u_{\delta t}$ standardní nejistota teplotního rozdílu mezi etalonovou a kalibrovanou měrkou
jelikož měřky zůstávají v laboratoři relativně dlouhou dobu, aby došlo ke sjednocení teploty, neměl by jejich rozdíl přesáhnout $\pm 0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Při tomto rozdílu teplot bychom se ovšem už dopouštěli hrubé chyby při měření,

$$u_{\delta t} = \frac{\delta t}{\sqrt{3}} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,173^{\circ}\text{C}.$$

$u_{\Delta t}$ standardní nejistota odchylky teploty od 20°C
v praxi se tato odchylka pohybuje do hodnot $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Jelikož je měření prováděno v laboratoři, která disponuje klimatizačním systémem, je maximální hodnota tohoto rozdílu velmi nepravděpodobná,

$$u_{\Delta t} = \frac{\Delta t}{\sqrt{3}} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,173^{\circ}\text{C}.$$

$u_{\delta \alpha}$ standardní nejistota rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti materiálu etalonové a kalibrované měřky
při použití měrek odlišného materiálu (ocel-keramika) je rozdíl koeficientů teplotní roztažnosti materiálu přibližně $2 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} = 2 \mu\text{m}/\text{m }^{\circ}\text{C}$.
(Střední hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti oceli bereme $11,5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} = 11,5 \mu\text{m}/\text{m }^{\circ}\text{C}$, keramiky $9,5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} = 9,5 \mu\text{m}/\text{m }^{\circ}\text{C}$.), [1]

$$u_{\delta \alpha} = \frac{\delta \alpha}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \doteq 1,155 \mu\text{m}/\text{m }^{\circ}\text{C}.$$

Po dosazení jednotlivých složek do rovnice standardní nejistoty měření získáme výsledek:

$$u = \sqrt{u_{LS}^2 + u_{\delta L}^2 + u_{\delta LC}^2 + (L \cdot \alpha \cdot u_{\delta t})^2 + (L \cdot u_{\Delta t} \cdot u_{\delta \alpha})^2}$$

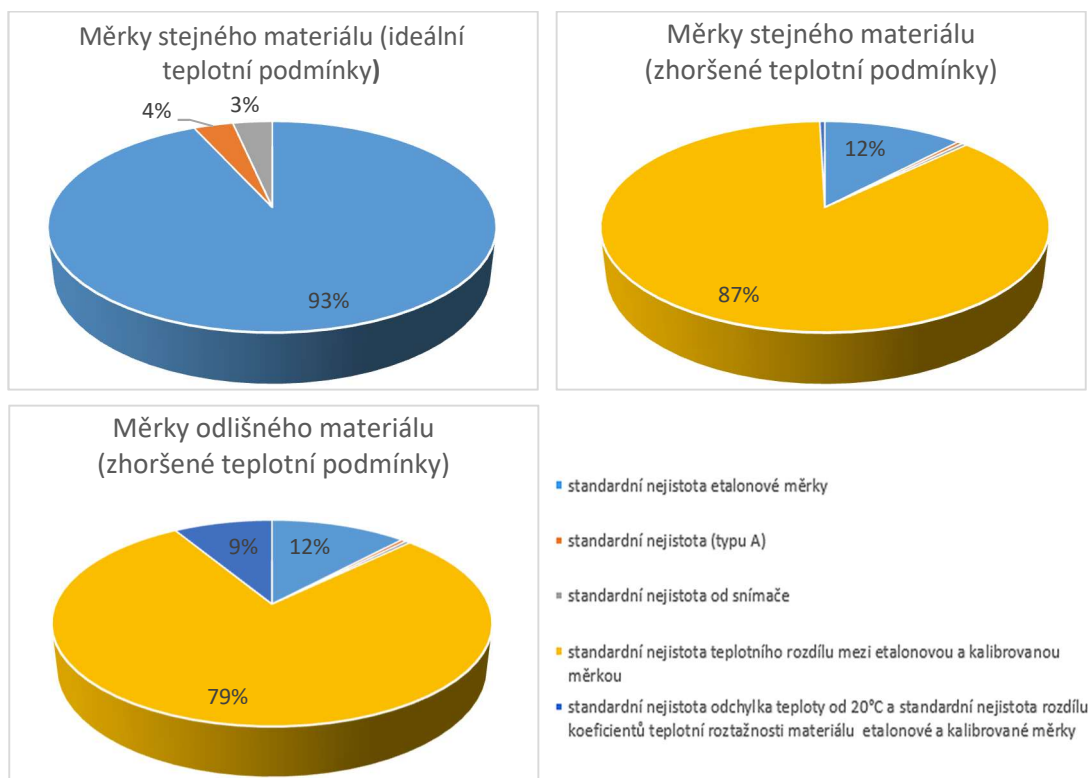
$$u = \sqrt{0,275^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + (1 \cdot 10,5 \cdot 1,173)^2 + (1 \cdot 0,173 \cdot 1,155)^2}$$

$$u \doteq 1,848 \mu\text{m}.$$

Rozšířená nejistota:

$$U = 2 \cdot u = 2 \cdot 1,848 \doteq 3,70 \mu\text{m}.$$

Jednotlivé podíly složek nejistoty u měrek 1000 mm



Obr. 36) Podíl jednotlivých složek na výslednou nejistotu u měrek 1000 mm

Tento kvalifikovaný odhad provedený pro různé varianty nám dokázal, že při dodržení podmínek měření, a to především sjednocení teplot etalonové a kalibrované měrky, můžeme dosáhnout velmi přívětivé nejistoty měření. V opačném případě, kdy nedojde k úplnému dodržení laboratorních podmínek, se nejistota rychle zvětšuje.

7.1 Simulace metodou Monte Carlo

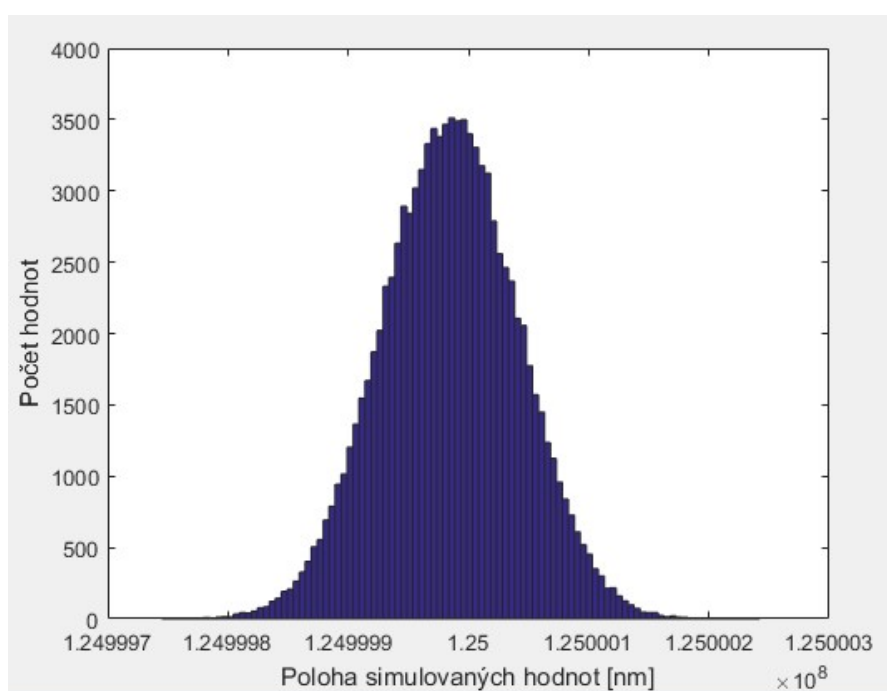
Postup výpočtu metodou Monte Carlo byl již popsán v jedné z předcházejících kapitol. Simulace byly provedeny pro všechny varianty tak, aby mohlo dojít k porovnání nalezených výsledku. Po doplnění scriptu o nutné vstupní veličiny jsou potom výstupem simulací histogramy znázorňující polohu modelovaných hodnot, průměry vygenerovaných hodnot, standardní a rozšířené nejistoty. Příklad scriptu vytvořeného v Matlabu je zobrazen v příloze A. Výstupní hodnoty parametrů a příslušné histogramy k jednotlivým variantám jsou uvedeny v následujících tabulkách (6, 7, 8, 9, 10, 11) a na obrázcích (č. 33, 34, 35, 36, 37, 38). [24]

Nejistoty měření pro měrky délky 125 mm

- Měrky stejného materiálu (ideální teplotní podmínky)

Tab 6) Vypočtené parametry pro měrky 125 mm stejného materiálu (ideální teplotní podmínky)

Parametr	Vypočtené hodnoty [nm]	
Pr_Y	Průměr z vygenerovaných hodnot	124,999984e+06
uY	Standardní nejistota měření	56,71
UY	Rozšířená nejistota měření	113,43

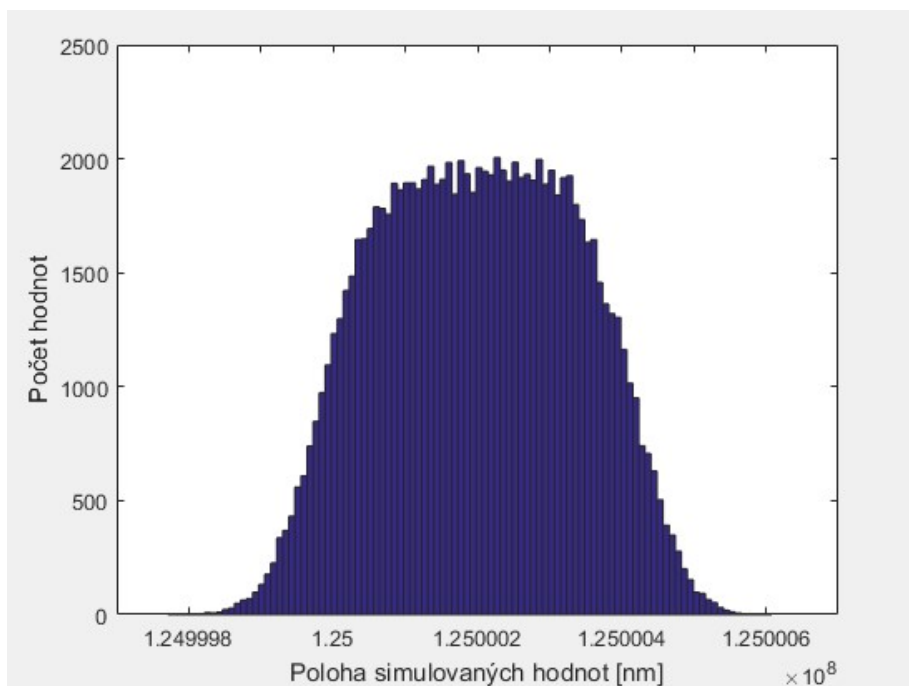


Obr. 37) Histogram simulovaných hodnot pro měrky 125 mm stejného materiálu (ideální teplotní podmínky)

- **Měrky stejného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)**

Tab 7) Vypočtené parametry pro měrky 125 mm stejného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)

Parametr	Vypočtené hodnoty [nm]	
Pr_Y	Průměr z vygenerovaných hodnot	125,00020e+06
uY	Standardní nejistota měření	136,92
UY	Rozšířená nejistota měření	273,84

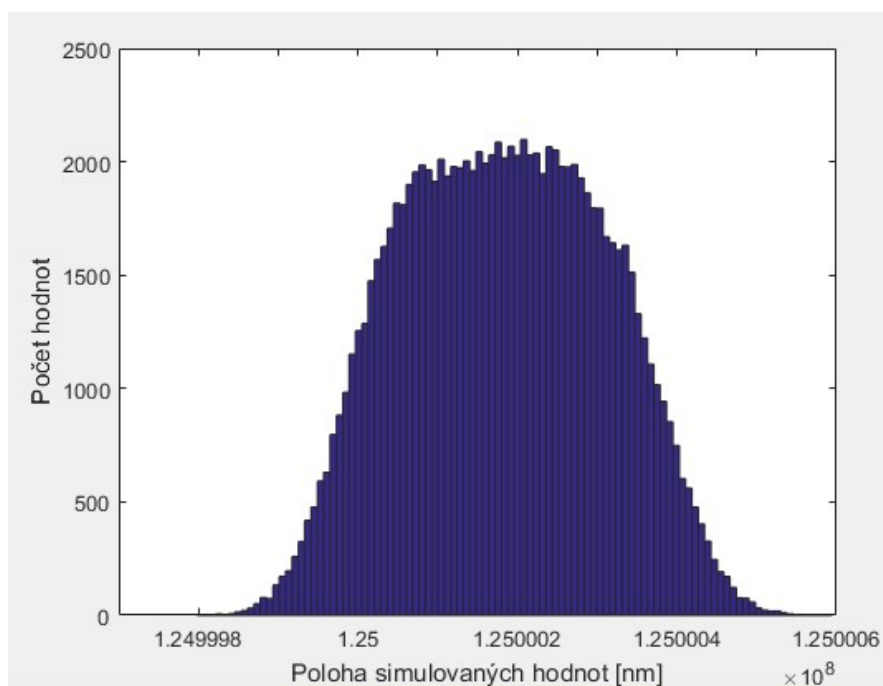


Obr. 38) Histogram simulovaných hodnot pro měrky 125 mm stejného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)

- **Měrky odlišného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)**

Tab 8) Vypočtené parametry pro měrky 125 mm odlišného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)

Parametr	Vypočtené hodnoty [nm]	
Pr_Y	Průměr z vygenerovaných hodnot	125,00018e+06
uY	Standardní nejistota měření	127,37
UY	Rozšířená nejistota měření	254,73



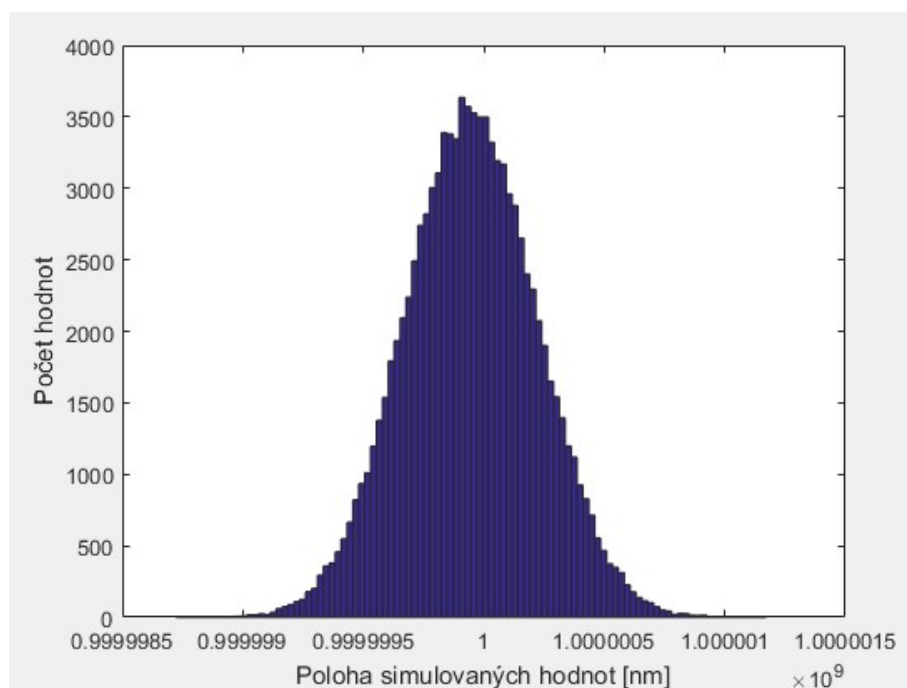
Obr. 39) Histogram simulovaných hodnot pro měrky 125 mm odlišného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)

Odhad nejistoty měření pro měrky délky 1000 mm

- Měrky stejného materiálu (ideální teplotní podmínky)

Tab 9) Vypočtené parametry pro měrky 1000 mm stejného materiálu (ideální teplotní podmínky)

Parametr	Vypočtené hodnoty [nm]	
Pr_Y	Průměr z vygenerovaných hodnot	999,9999467e+06
uY	Standardní nejistota měření	275,70
UY	Rozšířená nejistota měření	551,40

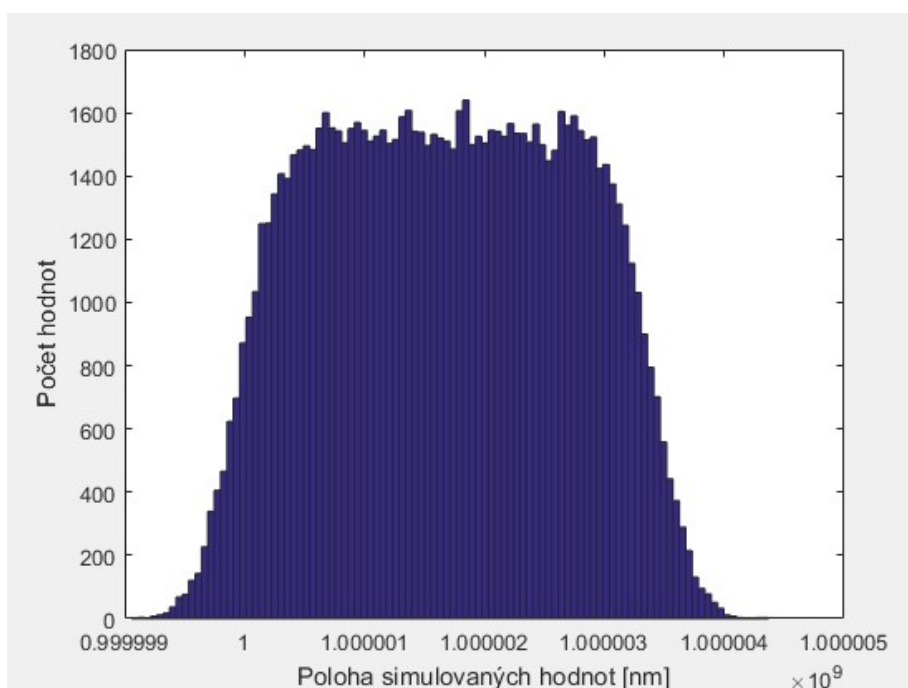


Obr. 40) Histogram simulovaných hodnot pro měrky 1000 mm stejného materiálu (ideální teplotní podmínky)

- **Měrky stejného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)**

Tab 10) Vypočtené parametry pro měrky 1000 mm stejného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)

Parametr	Vypočtené hodnoty [nm]	
Pr_Y	Průměr z vygenerovaných hodnot	1000,001677e+06
uY	Standardní nejistota měření	1033,44
UY	Rozšířená nejistota měření	2066,88

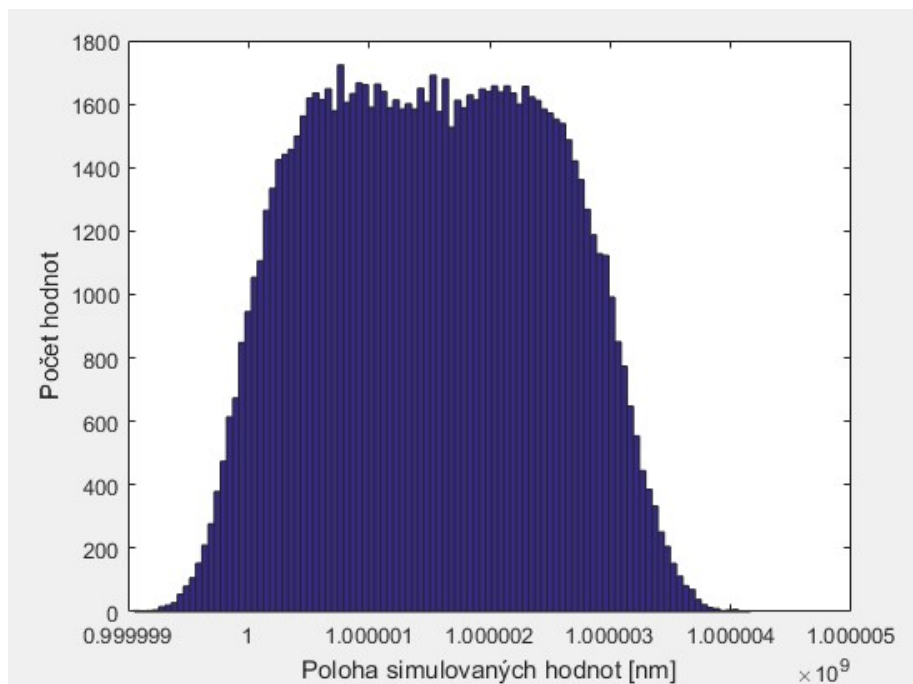


Obr. 41) Histogram simulovaných hodnot pro měrky 1000 mm stejného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)

- **Měrky odlišného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)**

Tab 11) Vypočtené parametry pro měrky 1000 mm odlišného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)

Parametr	Vypočtené hodnoty [nm]	
Pr_Y	Průměr z vygenerovaných hodnot	1000,001523e+06
uY	Standardní nejistota měření	956,25
UY	Rozšířená nejistota měření	1912,51



Obr. 42) Histogram simulovaných hodnot pro měrky 1000 mm odlišného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)

Po provedení všech variant simulací můžeme konstatovat, že výsledky odpovídají očekávání, a to i přes fakt, že se hodnoty určitým způsobem liší od hodnot vypočtených v předcházející kapitole, především z důvodu zjednodušení simulačního modelu a také zahrnutí částečných korekcí.

8 TECHNICKÁ DOKUMENTACE

Mezi technickou dokumentaci je třeba zařadit kleštinu, zobrazenou na obrázku č. 43, jejíž úkolem je připevnění indukčnostního snímače k tělu délkoměru. Součást je velmi jednoduché konstrukce, je vyrobená z nerezové oceli ČSN EN 1.403 vykazující dostatečnou odolnost a obrobiteľnosť. K utažení snímače v kleštině je použit šroub imbus DIN 6912 M8x16. Výkres součásti je uveden v příloze B. Následující obrázek č. 44 zobrazuje sestavu snímače a kleštiny. Samotný výkres snímače je přiložen v příloze C.



Obr. 43) Kleština



Obr. 44) Sestava snímač-kleština

9 ZÁVĚR

Obecným a hlavním cílem diplomové práce bylo přinést poznatky, které jsou prakticky uplatnitelné pro inovaci přístroje Zeiss/Tesa. Konkrétně se práce zaměřuje na technické řešení přístroje, který slouží pro kalibraci dlouhých koncových měrek. S ohledem na skutečnost, že používaný kalibrační přístroj nepatří mezi poslední výtobytky moderní techniky, bylo nutné pozornost směřovat na možnou výměnu stěžejních komponent. Zároveň bylo třeba mít na mysli nejen budoucí teoretickou využitelnost, ale i praktickou proveditelnost modernizace tak, aby byla pro pracoviště ČMI Brno přínosem.

Předložená diplomová práce se skládá z několika kapitol, kdy každá z nich má své nezastupitelné místo. Úvodní část se věnuje vydefinování základních metrologických pojmů a termínů. Samostatný oddíl poskytl vymezení chyb měření, jejich druhy a přiblížení postupu stanovení nejistoty. Poslední oddíl předmětné kapitoly obsahuje popis koncových měrek, jejich vlastnosti a varianty využití a rozbor požadavků na kalibraci koncových měrek dle ČSN EN ISO 3650.

Následující kapitola připomíná důležitost přesného a spolehlivého měření, které se projevuje i právních předpisech a technických normách, roli Českého metrologického institutu a akreditovaných kalibračních laboratoří a nepostradatelnost metrologické návaznosti měřidel. Pro potřeby této práce i praxe jsou relevantní především státní etalony, které jsou navázány na etalony mezinárodní a které ručí za exaktnost měření v celé České republice.

Jedna ze samostatných kapitol pojednává o metodě Monte Carlo, která byla zvolena jako ideální volba pro vytvoření simulace nejistoty měření. Mimo praktickou část, tedy výpočty nejistot měření, je metoda Monte Carlo popsána i teoreticky a pro větší názornost je prezentována na výpočtu Ludolfova čísla. Jelikož je jejím základním principem nakládání s náhodnými čísly, je popsán jejich zisk a software, který se pro danou metodu využívá. Pro odbornější úkony je doporučen Matlab, avšak pro jeho vysokou pořizovací cenu je možno uvažovat o programu Octave.

Mezi pilíře práce patří analýza technického stavu přístroje a jeho komponent a rešerše možných technických řešení. Za jednu z největších nevýhod byla označeno nebezpečí poruchy elektronických částí, neboť náhradní díly není možno v současnosti zajistit. Samotný návrh modernizace byl omezen požadavky kladenými Českým metrologickým institutem. Klíčovými pro vylepšení se staly snímače délky, snímače teploty a zjednodušení výstupu měřených dat.

Za nejlepší variantu lze označit využití indukčnostního snímače PETER HIRT T101F, jehož parametry zcela odpovídají účelu jeho využití, přičemž dalším pozitivem je fakt, že zastoupení firmy PETER HIRT v České republice zabezpečuje společnost Mesing, s kterou má Český metrologický institut dlouholeté kladné zkušenosti. Kvalifikovaným odhadem a následnou simulací bylo zjištěno, že při dodržení laboratorních podmínek měření, a to především stálosti teploty, bude výsledná nejistota na velmi dobré úrovni.

Poslední dvě kapitoly přinášejí odhad a simulaci nejistoty měření pro měrky délky 125 mm a 1000 mm, kdy je variabilně měněna kombinace materiálu etalonové a kalibrované měrky či přetvářeny teplotní podmínky, a neopominutelnou technickou dokumentaci.

Věřím, že přístroj při akceptaci navrhované modernizace má potenciál i v budoucnu kvalitně a dlouho sloužit svému účelu a s ohledem na finanční náklady se zajisté jedná o řešení příznivější, než je využití technologií jiných či nových a praxí nevyzkoušených.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4010-4.
- [2] *Mezinárodní metrologický slovník TNI 01 0115: Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [3] *Český metrologický institut* [online]. Brno: Český metrologický institut [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/>
- [4] PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. *Strojírenská metrologie II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3338-8.
- [5] Zákon o metrologii: 505/1990 Sb. In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 1990. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1990-505>
- [6] *EA-4/02: Vyjádření měření nejistoty při kalibraci*. Praha: Český institut pro akreditaci, 2014.
- [7] ŠRÁMEK, Jan. *Vyjádřování nejistoty u přesných délkových měření II*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické,. Vedoucí práce Ing. PETR KOŠKA, Ph.D.
- [8] *Geometrické požadavky na výrobky (GPS): Etalony délek - Koncové měrky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2000.
- [9] *Mitutoyo* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://shop.mitutoyo.cz>
- [10] *Mesing* [online]. Brno: Mesing, c2017 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.mesing.cz>
- [11] *Český institut pro akreditaci* [online]. Praha: Český institut pro akreditaci, c2019 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.cai.cz/>
- [12] *Sborníky technické harmonizace: Metrologie v kostce*. Třetí upravené a doplněné vydání. Praha: UNMZ, 2009.
- [13] ŠÍRA, Martin. Jak na nejistoty metodou Monte Carlo jednoduše a bez drahých programů. *Elektrorevue*. Brno: Český metrologický institut, 2014, , 86-95. ISSN 1213-1539.

- [14] KNEŽO, Dušan. O METÓDE MONTE CARLO A MOŽNOSTIACH JEJ APLIKÁCIÍ. *Transfer inovácií* [online]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2012, , 178-181 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/24-2012/pdf/178-181.pdf>
- [15] ŠÍRA, Martin. *Výpočet nejistot metodou Monte carlo* [online]. In: . Brno: Český metrologický institut, 2012 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.kaero.wz.cz/clankyruzne/12-vut-mc.pdf>
- [16] ŠÍRA, Martin, Věra NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, Jan OTYCH a Jaroslav ZŮDA. Vybrané problémy metrologie fyzikálních a elektrických veličin: Učební texty k semináři [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: [crr.vutbr.cz](http://www.vutbr.cz)
- [17] DŘÍMAL, Jiří, David TRUNEC a Antonín BRABEC. *ÚVOD DO METODY MONTE CARLO* [online]. Brno, 2006 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.physics.muni.cz/~trunec/mc.pdf>. Skripta. Masarykova univerzita.
- [18] ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technického směru*. 2., upravené a dopln. vyd. Praha: SNTL, 1983. Automatizace a regulace.
- [19] PAVLIŠ, J. Speciální snímače délky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Róbert Jankových, CSc
- [20] Electronic Length Measuring Equipment. *Měřicí přístroje* [online]. Tesa Technology [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: http://www.merici-pristroje.cz/files/ckeditor//5_Produkty/5-31_tesa/3_komunalni_meridla/294_%C3%BAheln%C3%ADky%2C%C3%BAhlom%C4%9Bry.pdf
- [21] *Mahr* [online]. Göttingen: Mahr [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.mahr.com>
- [22] *Renishaw* [online]. New Mills: Renishaw, c2001-2019 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/>
- [23] *Comet* [online]. Praha: Spaneco, c2019 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.cometsystem.cz/>
- [24] BRLICA, P. Stanovení nejistoty měření nano-CMM. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Šrámek.

11 SEZNAM TABULEK, OBRÁZKŮ, ZKRATEK A SYMBOLŮ

11.1 Seznam tabulek

Tab 1) Koeficienty v závislosti na počtu měření ($n < 10$) [4]	29
Tab 2) Koeficienty rozšíření	35
Tab 3) Tolerované úchytky jmenovité délky t_e a tolerance t_v pro rozpětí délky [8]	37
Tab 4) Tolerance rovinnosti [8].....	38
Tab 5) Srovnání snímačů PETER HIRT, Tesa, Mahr [10,20,21]	56
Tab 6) Vypočtené parametry pro měřky 125 mm stejného materiálu (ideální teplotní podmínky)	74
Tab 7) Vypočtené parametry pro měřky 125 mm stejného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)	75
Tab 8) Vypočtené parametry pro měřky 125 mm odlišného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)	76
Tab 9) Vypočtené parametry pro měřky 1000 mm stejného materiálu (ideální teplotní podmínky)	77
Tab 10) Vypočtené parametry pro měřky 1000 mm stejného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)	78
Tab 11) Vypočtené parametry pro měřky 1000 mm odlišného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)	79

11.2 Seznam obrázků

Obr. 1) Klasifikace chyb měření [4]	24
Obr. 2) Grafické vyjádření chyb [1].....	26
Obr. 3) Znázornění nejistot ve výsledků měření [7]	27
Obr. 4) Normální rozdělení [4].....	32
Obr. 5) Rovnoměrné rozdělení [4]	33
Obr. 6) Trojúhelníkové rozdělení [4].....	33
Obr. 7) Sada koncových měrek do 100 mm [9].....	35
Obr. 8) Rozměry koncových měrek [1].....	36
Obr. 9) Schéma postupu nasávání koncových měrek [1].....	36
Obr. 10) Stojánek Mesing na kalibraci koncových měrek do 100 mm [10]	40
Obr. 11) Způsob realizace metrologické návaznosti platný pro laboratoře v ČR [11]	41
Obr. 12) Řetězec metrologické návaznosti [12].....	42
Obr. 13) Porovnání vstupních a výstupních údajů metod GUF a MMC [13].....	44
Obr. 14) Algoritmus výpočtu nejistot metodou Monte Carlo [13]	45
Obr. 15) Výpočet Ludolfova čísla MMC [15].....	46

Obr. 16) Závislost přesnosti na počtu opakování [15]	46
Obr. 17) Prostředí programu Matlab	49
Obr. 18) Tělo délkoměru Zeiss	51
Obr. 19) Indukčnostní snímač Tesa	52
Obr. 20) Zobrazovací jednotka Tesa S403.....	52
Obr. 21) Dotyková magnetická čidla značky Amet	52
Obr. 22) Indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým obvodem [18]	54
Obr. 23) Průběh intenzity magnetického pole při diferenčním zapojení indukčnostního snímače [18]	54
Obr. 24) Tužkový indukčnostní snímač [20]	55
Obr. 25) PETER HIRT T101F [10].....	56
Obr. 26) Snímač VIONIC [22]	57
Obr. 27) Ocelové pravítko RSLM20 [22]	57
Obr. 28) Filtrační optika snímače VIONiC [22]	58
Obr. 29) Rozhraní ADT [22].....	58
Obr. 30) Záznamník Comet U7844 [23]	59
Obr. 31) Teplotní sonda Comet Pt1000TR158 [23].....	59
Obr. 32) Prostředí programu Comet Vision 2 [23]	60
Obr. 33) Vyhodnocovací jednotka Imeco TB2	60
Obr. 34) Prostředí programu Měrky [10].....	61
Obr. 35) Podíl jednotlivých složek na výslednou nejistotu u měrek 125 mm	68
Obr. 36) Podíl jednotlivých složek na výslednou nejistotu u měrek 1000 mm ..	73
Obr. 37) Histogram simulovaných hodnot pro měrky 125 mm stejného materiálu (ideální teplotní podmínky)	74
Obr. 38) Histogram simulovaných hodnot pro měrky 125 mm stejného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)	75
Obr. 39) Histogram simulovaných hodnot pro měrky 125 mm odlišného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)	76
Obr. 40) Histogram simulovaných hodnot pro měrky 1000 mm stejného materiálu (ideální teplotní podmínky)	77
Obr. 41) Histogram simulovaných hodnot pro měrky 1000 mm stejného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)	78
Obr. 42) Histogram simulovaných hodnot pro měrky 1000 mm odlišného materiálu (zhoršené teplotní podmínky)	79
Obr. 43) Kleština.....	81
Obr. 44) Sestava snímač-kleština	81

11.3 Seznam zkratek

Zkratka	Význam
ČMI	Český metrologický institut
ČSN	Česká technická norma
EN	evropská norma
ISO	International Organization for Standardization – mezinárodní organizace pro normalizaci
TNI	Technická normalizační informace
GUM	Guide the expression of uncertainty in measurement
EA	european accreditation
WECC	Western European Calibration Cooperation
NMI	Národní metrologický institut
AKL	Akreditované kalibrační laboratoře
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation
MRA	Mutual Recognition Arrangement
COV	certifikační orgán na výrobky
IO	inspekční orgán
MMC	metoda Monte Carlo
GUF	GUM uncertainty framework

11.4 Seznam symbolů

α	koeficient teplotní roztažnosti materiálu
$\delta\alpha$	rozdíl koeficientů teplotní roztažnosti materiálu etalonové a kalibrované měřky
δL	zjištěný rozdíl délky mezi kalibrovanou a etalonovou měrkou
δL_c	korekce snímače
δ_m	největší dovolená chyba
δ_{max}	maximální hodnota náhodné chyby
δt	teplotní rozdíl mezi etalonovou a kalibrovanou měrkou
Δ	absolutní chyba
Δ_p	relativní chyba vyjádřená v procentech
Δ_r	relativní chyba
Δ_s	systematická chyba
κ	součinitel vycházející ze zákona rozdělení pravděpodobnosti
v	rozpětí délek
A	konstanta zahrnující vliv náhodných chyb
A_j	součinitel citlivosti

B	konstanta zahrnující vliv nevyloučených systematických chyb
C	horní hranice chyby δ_m
Δt	odchylka teploty od 20 °C (průměr etalonové a kalibrované měrky).
f_d	úchylka rovinnosti
k	koeficient rozšíření
k_s	koeficient korekce nízkého počtu měření
l_c	středová délka koncové měrky
l_n	jmenovitá délka koncové měrky
L_s	délka etalonové měrky při referenční teplotě 20 °C
L_x	délka kalibrované měrky při referenční teplotě 20 °C
n	počet opakování měření
N	počet opakování při MMC
s_x	směrodatná odchylka
$s_{\bar{x}}$	výběrová směrodatná odchylka průměru
$s_{\bar{x}}^2$	výběrový rozptyl průměru
t_e	tolerance jmenovité délky
t_f	tolerance rovinnosti
U	rozšířená nejistota měření
u	standardní nejistota výstupní veličiny
$u_{\delta\alpha}$	standardní nejistota rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti materiálu etalonové a kalibrované měrky.
$u_{\delta L}$	standardní nejistota (typu A) zjištěného rozdílu délek
$u_{\delta LC}$	standardní nejistota od snímače
$u_{\delta t}$	standardní nejistota teplotního rozdílu mezi etalonovou a kalibrovanou měrkou
$u_{\Delta t}$	standardní nejistota odchylka teploty od 20 °C
u_A	standardní nejistota typu A
u_B	standardní nejistota typu B
u_c	kombinovaná nejistota měření
U_e	nejistota etalonové měrky
U_{ind}	rozšířená nejistota indikace zkoušeného měřidla
u_{LS}	standardní nejistota etalonové měrky
v_{eff}	efektivní stupně volnosti
\bar{x}	výběrový aritmetický průměr
X_{ind}	indikace zkoušeného přístroje

x_m	hodnota měřené veličiny zjištěná měřením
x_p	(konvenčně) pravá hodnota měřené veličiny
Y	skutečná hodnota veličiny
y	naměřená hodnota dané veličiny
Z_i	zdroje nejistot standardní nejistoty typu B
Z_{jmax}	maximální odchylka zdroje nejistoty typu B

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Script MMC (příklad pro měrku 125 mm ideální teplotní podmínky)

Příloha B – Výkres kleštiny

Příloha C – Výkres snímače PETER HIRT T101F

PŘÍLOHY

Příloha A

```
% Metoda Monte Carlo pro simulaci nejistoty měření
|
% Import naměřených dat
A=importdata('125.txt'); %Import dat do matice A

%% Vstupní veličiny MCM
M=100000; %Počet opakování MCM

%Normální rozdělení
pX=mean(A) %pX=očekávaná hodnota
sX=std(A) %sX=směrodatná odchylka
Y_s=normrnd(pX,sX,1,M);
%Studentovo rozdělení
nX=numel(A)-1;
Yk=trnd(nX,1,M).*sX+pX;

% alfa -> Koefficient teplotní roztažnosti , [°C]
% Rovnoměrné rozdělení
alfal=11.45*10^-6; %meze
alfau=11.55*10^-6; %meze
alfa=unifrnd(alfal,alfau,1,M);

% delta -> Rozdíl teplot mezi etalonovou a kalibrovanou měrkou [°C]
% Rovnoměrné rozdělení
deltal=0; %meze
deltau=0; %meze
delta=unifrnd(deltal,deltau,1,M);

%korekce nejistoty
% Normální rozdělení
pXK=125000040; %očekávaná hodnota
sXK=56; %směrodatná odchylka-nejistota
kalibrace=normrnd(pXK,sXK,1,M);
nom=125000000;

%% Model Y=f(x)
Y=nom*(1+alfa.*delta)-(Yk-kalibrace);

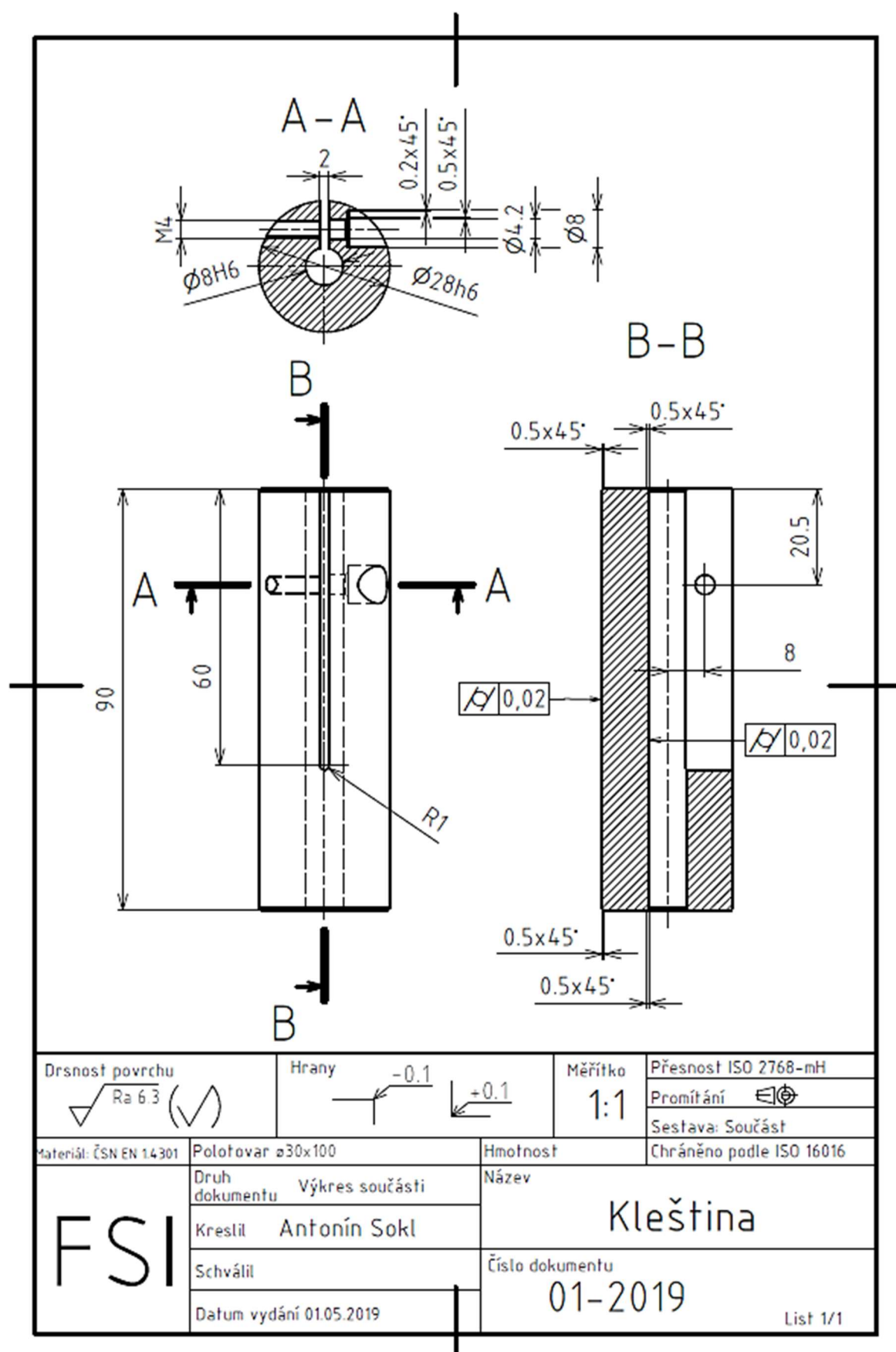
%% Výsledky metody monte Carlo
% Vykreslení histogramu
hist(Y,100)

%Výpočet průměru z vygenerovaných hodnot daného modelu
Pr_Y=mean(Y)

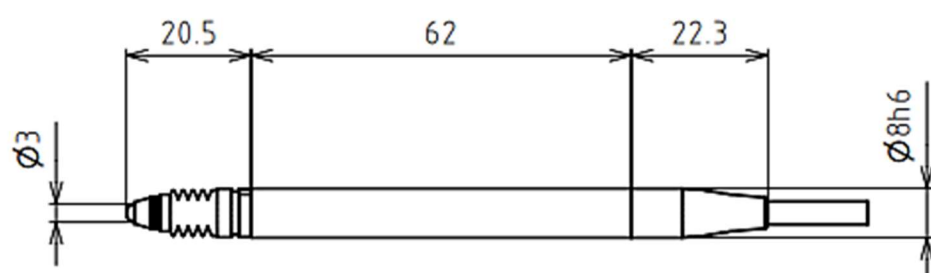
%% Výpočet nejistoty
%Výpočet standardní nejistoty při normálním rozdělení vygenerovaných hodnot
daného modelu
uY=std(Y)

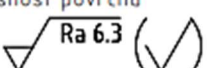
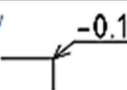

%Výpočet rozšířené nejistoty, kdy k=2 vygenerovaných hodnot daného modelu
UY=uY*2
```

Příloha B



Příloha C



Drsnost povrchu  Ra 6.3 (✓)		Hrany  -0.1 +0.1		Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768-mH
Materiál:		Hmotnost		Promítání 	
Druh dokumentu Výkres součásti		Název		Sestava: Součást	
Kreslil Antonín Sokl		Indukčnostní snímač		Chráněno podle ISO 16016	
Schválil		Číslo dokumentu			
Datum vydání 17.05.2019		02-2019			
FSI				List 1/1	